機械加工面の官能評価の定量化に向けた 視覚シミュレーション手法の開発*

井原基博** 山路伊和夫*** 藤井一二† 渡辺健志†† 矢内正隆††† 松原 厚***

Development of a Visual Simulation Method for Quantifying Sensory Evaluation of Machined Surface

Motohiro IHARA, Iwao YAMAJI, Katsuji FUJII, Takeshi WANATABE,

Masataka YAUCHI and Atsushi MATSUBARA

Machined surfaces are judged to determine machining conditions. Two types of criteria are used: one is quantitative parameters including surface roughness and the other is sensory parameters of a tester, such as glossiness, iridescence and sense of discomfort. Sensory parameters and their representations are dependent on the experience and personality of the tester. Consequently, we cannot evaluate machined surfaces quantitatively considering human sensory parameters. In this research, we aim to classify sensory parameters, and evaluate machined surfaces quantitatively. To investigate the sensory parameters, it is necessary to simulate human visual information such as luminance and color. In this paper, we propose a visual simulation method to calculate visual information directly using shape data of a machined surface based on Beckmann's theory on the scattering of electromagnetic waves. As the first case study, we applied the proposed method to a turned aluminum surface and simulated intensity distribution of reflected light agreed with microscope image. As the second case study, the proposed simulation was applied to an iridescent surface and its color was simulated. The results show that the simulated color transition by the observation direction agreed well with photographs.

Key words: machined surface, sensory evaluation, sensory parameter, visual simulation, iridescent surface

1. 緒 言

一般に機械加工の現場では、加工条件を決定するために加工面の良否判定がおこなわれる。良否の判定基準には、形状精度・寸法精度・表面粗さといった定量的な指標がある。しかしながら、良否の判定には人の感覚に基づいた指標（官能指標）も用いられ、その例として光沢感や虹、違和感などが挙げられる。評価者によって、加工面を観察する手順や官能指標の表現は大きく異なるため、官能指標を定量化することは困難であり、官能指標の体系化の課題となっている。

切削加工では工具の刃先形状と運動軌跡が加工面性状に影響する。理想的な切削が行われた場合、刃先の運動方向の軌跡と垂直方向の稜線は加工面に転写されると考えられる。回転工具を用いた加工の場合、送り運動と回転運動が正確であり、刃先稜線が滑らかであるなら、加工面は規則的な形状（カスプと呼ばれる）を持つことになる。この形状は切削条件でそのパターンが変化するが規則性を持ち、加工面を分析する際の基本形状となる。工具軌跡に誤差がある場合、加工面には基本形状とは異なったパターンの形状が創成される。これらの形状は、肉眼で加工面の凹凸として認識されるので、加工面の巨視的な性状の特徴をあらわしているといえる。

一方、刃先にはサブ μm の微細な凹凸があり、塑性流動などの因子とともに、加工面の微視的な形状に影響する。微視的な形状は、形としてより、色や光沢などの性状として認識される。しかし、巨視的な性状も加工面から肉眼に到達する光に影響するため、微視的な性状と統合して加工面を評価する必要がある。

機械加工面の見え方に関する先行研究は多くあり、これらは以下の研究に分類できる。

- (1) 写真画像から特徴量を抽出する方法¹⁾²⁾³⁾⁴⁾⁵⁾
- (2) 光沢度や表面色といった人間の視覚情報に着目した指標を用いる方法⁶⁾⁷⁾⁸⁾
- (3) 加工面の見えをコンピュータグラフィックス (CG) により再現する方法⁹⁾

(1)の方法における加工面画像や、(2)の方法において測定した加工面の視覚情報には、巨視的・微視的な性状の両方が含まれていると考えられるが、両者を分離して物理的に説明した例は見られない。

(3)の方法については、特に佐藤ら⁹⁾は汎用のレンダリングソフトウェアを利用し、工作機械の運動誤差が加工面の巨視的な性状に影響を及ぼすことを明らかにした。CG には様々な反射モデルが利用されるが、物理に基づいたモデルとして Cook-Torrance モデル¹⁰⁾が有名である。これは、波動光学におけるスカラー回折理論を用いた Beckmann の散乱理論¹¹⁾を応用している。CG では計算コストを抑えることが望まれるため、微視的な形状を平均化して光の反射を表現している。したがって、微視的な性状を厳密に評価することは難しい。

そこで本研究では Beckmann の散乱理論を応用し、加工面の形状データを平均化することなく用いて反射光の強度を計算し、人の視覚系の空間分解能を考慮した視覚シミュレーション手法

* 原稿受付 令和3年6月3日
掲載決定 令和3年8月19日
** 学生会員 京都大学大学院工学研究科
(京都府京都市西京区京都大学桂 C3 棟)
*** 正 会 員 京都大学大学院工学研究科
† 日進工具株式会社
(宮城県黒川郡大和町松坂平 2-8)
†† 正 会 員 日進工具株式会社
††† 正 会 員 大昭和精機株式会社
(大阪府東大阪市西石切町 3-3-39)

を構築する。視覚シミュレーション手法を用いて加工面の視覚情報（輝度と色）を画像データとして再現し解析することで、官能指標を調査する。

本論文では視覚シミュレーション手法を提案し、ケーススタディとして旋削加工面と虹面の評価に適用する。提案手法が加工面の微視的な性状を表現できるかを検証する。

2. 視覚シミュレーション手法

2.1 視覚シミュレーションの全体

視覚シミュレーション手法の全体的な流れは CG の工程にならうこととする。CG の工程はデジタルカメラを用いた写真撮影に似ているため、デジタルカメラモデルと呼ばれる¹²⁾。図 1 に示すように、デジタルカメラモデルは主に(a)モデリング、(b)投影、(c)シェーディング、(d)輝度と色の計算の4つの段階に分けられる。次節以降では、各段階を順に説明する。

2.2 モデリング

ワーク形状は理想的には曲面であるが、図 2 に示すように、測定では測定位置 (x_i, y_j) それぞれに対して高さのデータ $z_{i,j}$ が得られる。そこで各測定点を中心として微小な平面（マイクロファセット）を張り $\Sigma_{i,j}$ とおく。ワーク座標系を $O-xyz$ をとし、 e_x, e_y, e_z をそれぞれ x, y, z 方向の基底ベクトルとする。また測定位置の間隔を $2L$ とする。測定点の位置ベクトルを $x_{i,j}$ とおく

$$x_{i,j} = x_i e_x + y_j e_y + z_{i,j} e_z \quad (1)$$

と書ける。各マイクロファセット内では勾配が一定であると近似すると、 $\Sigma_{i,j}$ は

$$z = A_{i,j}(x - x_i) + B_{i,j}(y - y_j) + z_{i,j} \quad (2)$$

$$(-L + x_i \leq x \leq L + x_i, -L + y_j \leq y \leq L + y_j)$$

とあらわされる。ここで $A_{i,j}$ と $B_{i,j}$ はそれぞれ x, y 方向の勾配をあらわし、中心差分により次式で求める。

$$A_{i,j} = \frac{z_{i+1,j} - z_{i-1,j}}{2 \cdot 2L}, \quad B_{i,j} = \frac{z_{i,j+1} - z_{i,j-1}}{2 \cdot 2L} \quad (3)$$

表面の光学的特性については物体の屈折率を使う。一般に光の波長ごとに屈折率は異なる。本シミュレーションでは 380 nm から 780 nm までで 5 nm 間隔のデータを用いる。

2.3 投影

視点の位置と方向を定め、観察者の視野をあらわす投影面を作成する。投影面の画素と表面上の測定点に対応づける。

まず視点の位置と方向を定める。観察者の目の位置を P とし、

$$D = \overrightarrow{OP} \quad (4)$$

とおく。図 3 に示すように、観察者座標系 $P-stu$ をとる。図中の θ_2 と θ_3 は、ワーク座標系で D の方向をあらわす角度である。ワーク座標系 $O-xyz$ から観察者座標系 $P-stu$ への座標変換は付録 B に示す。

次に、観察者の視野をあらわす投影面を作成し、視覚系の空間分解能を考慮し投影面上に画素を配置する。投影面は、観察者座標系における平面 $u = |D|$ と考える。画素の配置については、視覚系で受光素子の役割をもつ錐体の分布を参考とする。Williams¹³⁾が錐体分布について調査した結果をもとに、図 4 に示すように、画素を投影面上で六方最密充填のように配置する。画素の間隔は視覚系の空間分解能に相当し、視野角で 0.5 分とする。画素の間隔 d は次式により求められる。

$$d = \frac{\pi}{180} \frac{0.5}{60} |D| \quad (5)$$

最後に表面上の測定点を投影面上の画素に対応づける。図 5 に

Fig.1 Outline of digital camera model

Fig.2 Discretizing surface shape to microfacets

Fig.3 Relationship between workpiece and observer coordinate systems

Fig.4 Pixels on projection plane

示すように $x_{i,j}$ を投影して投影面上に $q_{i,j}$ を作る。ワーク表面のうち、 α 番目の画素 $Q(\alpha)$ に投影される部分を

$\Sigma(\alpha)$ とおく。測定点の番号をあらわす (i, j) の組み合わせの中で、 $q_{i,j}$ が $Q(\alpha)$ に含まれるようなものを $(i(\alpha), j(\alpha))$ と書きあらわすこととする。 $\Sigma(\alpha)$ はマイクロファセット $\Sigma_{i(\alpha), j(\alpha)}$ を組み合わせたものであるとみなす。

2.4 シェーディング

2.3 節で定義した各画素について分光放射輝度 (Spectral radiance) を計算する。

光の波長を λ として、 $\Sigma(\alpha)$ の分光放射輝度 $L_e(\alpha, \lambda)$ と、 $\Sigma(\alpha)$ から P に達した反射光の強度 $I_{out}(P, \alpha, \lambda)$ の関係を考える。 $\Sigma(\alpha)$ から P までの距離を $D(\alpha)$ 、 $\Sigma(\alpha)$ のみかけの面積を $\Sigma_{apparent}(\alpha)$ とおく。 $L_e(\alpha, \lambda)$ と $I_{out}(P, \alpha, \lambda)$ の間には以下の関係がある¹⁴⁾。

$$L_e(\alpha, \lambda) = \frac{\{D(\alpha)\}^2}{\Sigma_{apparent}(\alpha)} I_{out}(P, \alpha, \lambda) \quad (6)$$

$I_{out}(P, \alpha, \lambda)$ の計算過程は3章で述べる。

2.5 輝度と色の計算

実際の神経回路において輝度と色の情報は、複数の錐体の応答を処理して得られることが知られている¹⁵⁾。したがって、画素 $Q(\alpha)$ での輝度と色は、 $Q(\alpha)$ と周辺の画素での値を平均化したものである。そこで、画素 $Q(\alpha)$ と、 $Q(\alpha)$ の中心から半径 $\sqrt{13}d$ の円の内部に中心をもつ画素での分光放射輝度を平均化して輝度と色を計算する。

各画素での輝度は、CIE (International Commission of Illumination, 国際照明委員会) の規格¹⁶⁾に基づいて分光放射輝度より計算する。

色を定量化するための体系である表色系の代表として CIE XYZ 表色系¹⁶⁾が知られている。CIE XYZ 表色系に基づいて、各画素での三刺激値を計算する。三刺激値はアナログ値であり、色をディスプレイ上に表示するにはAD変換をおこなう必要がある。そこで代表的な表色系である sRGB 表色系¹⁷⁾を用いて RGB の値を計算する。

3. 反射光の強度の計算過程

3.1 Beckmann の散乱理論

Beckmann の散乱理論によれば、Snell の法則と Kirchhoff の回折理論¹⁸⁾を組み合わせることで P での電場を計算することができる。以下では、Beckmann の理論に基づいて $I_{out}(P, \alpha, \lambda)$ を計算する手法を述べる。入射光は平面波であって、観察距離は光の波長 λ および表面の凹凸のスケールに比べ十分に長いと仮定する。

観測点 P での電場の振幅 $E_2(P)$ は次式により得られる。

$$E_2(P) = \frac{1}{4\pi} \int_{\Sigma(\alpha)} [E(\nabla\phi) \cdot \mathbf{n} - \phi(\nabla E) \cdot \mathbf{n}] d\Sigma \quad (7)$$

ここで E は $\Sigma(\alpha)$ 上での電場の振幅、 ϕ は Green 関数である。 $\mathbf{n}$ は $\Sigma(\alpha)$ 上の法線ベクトルであり、 $\Sigma(\alpha)$ から P へ向かう方向を向いている。

表面上の点 $\mathbf{x}$ のまわりの微小表面積要素 $d\Sigma$ で反射した光が P に作り出す電場を $dE_2(P, \mathbf{x})$ とおくと、

$$dE_2(P, \mathbf{x}) = \frac{1}{4\pi} [E(\nabla\phi) \cdot \mathbf{n} - \phi(\nabla E) \cdot \mathbf{n}] d\Sigma \quad (8)$$

であって、式 (7) は

$$E_2(P) = \int_{\Sigma(\alpha)} dE_2(P, \mathbf{x}) \quad (9)$$

と書き直せる。すなわち、表面上の任意の点で ϕ , $\nabla\phi$, E , ∇E を計算し式 (8) により $dE_2(P, \mathbf{x})$ を求め、さらに式 (9)

Fig.5 Projecting measurement points on surface onto projection plane

Fig.6 Surface shape and observation point

で積分することで $E_2(P)$ が得られる。

図 6 に、入射光および反射光の方向と表面形状、P の関係を示す。入射光と反射光の波数ベクトルをそれぞれ $\mathbf{k}_1$, $\mathbf{k}_2$ とおく。 $\mathbf{k}_1$ と $\mathbf{k}_2$ の大きさを $k = 2\pi/\lambda$ とする。表面上の点 $\mathbf{x}$ から P に向かうベクトルは $\mathbf{D} - \mathbf{x}$ である。さらに、 $\mathbf{D}$ のスケールが λ および $\mathbf{x}$ のスケールより十分大きいことを考慮して、 ϕ は

$$\phi = \frac{\exp[i\mathbf{k}_2 \cdot (\mathbf{D} - \mathbf{x})]}{|\mathbf{D} - \mathbf{x}|} \quad (10)$$

となる。 $\nabla\phi$ の空間微分を計算すると以下が得られる。

$$\nabla\phi = \phi \left[-i\mathbf{k}_2 - \frac{\mathbf{D} - \mathbf{x}}{|\mathbf{D} - \mathbf{x}|^2} \right] \approx -i\mathbf{k}_2\phi \quad (11)$$

3.2 入射光と反射光の偏光方向の考慮

光が表面上で反射するとき、偏光方向によって Fresnel 係数が異なるため、入射光と反射光の偏光方向を考える必要がある。Beckmann の理論では3次元の問題で偏光方向が考慮されていない。偏光方向を考慮した計算方法を以下に述べる。

図 7 に示すように、入射光の偏光方向をあらわす単位ベクトルを $\mathbf{e}_{1A}$, $\mathbf{e}_{1B}$ とおく。反射光についても同様に $\mathbf{e}_{2A}$, $\mathbf{e}_{2B}$ を定める。 $\mathbf{e}_{1A}$, $\mathbf{e}_{1B}$, $\mathbf{k}_1$ と $\mathbf{e}_{2A}$, $\mathbf{e}_{2B}$, $\mathbf{k}_2$ はそれぞれ図 7(b), (c)に示すように $\mathbf{e}_x$, $\mathbf{e}_y$, $\mathbf{e}_z$ を回転させることで得られる。入射光の電場の振幅を $\mathbf{e}_{1A}$, $\mathbf{e}_{1B}$ の方向にそれぞれ E_{1A} , E_{1B} とおく。

図 8 に示すように、表面上での入射光の p, s 偏光の方向をあらわす単位ベクトルをそれぞれ $\mathbf{e}_{1p}$, $\mathbf{e}_{1s}$ とおく。正反射光の波数ベクトルを $\mathbf{k}_r$ 、偏光方向をあらわす単位ベクトルをそれぞれ $\mathbf{e}_{rp}$, $\mathbf{e}_{rs}$ とおく。入射光の方向と表面の法線方向で定まる入射角を θ_{in} とおく。入射光の電場の振幅の p 偏光, s 偏光成分をそれぞれ E_{1p} , E_{1s} とおけば、

$$\begin{pmatrix} E_{1p} \\ E_{1s} \end{pmatrix} = \mathbf{M}_{1r} \begin{pmatrix} E_{1A} \\ E_{1B} \end{pmatrix} \exp[i\mathbf{k}_1 \cdot \mathbf{x}] \quad (12)$$

となる。ただし、

$$M_{1r} = \begin{bmatrix} e_{1p}^T \\ e_{1s}^T \end{bmatrix} \begin{bmatrix} e_{1A} & e_{1B} \end{bmatrix} \quad (13)$$

次に、正反射光の電場の振幅の p 偏光, s 偏光成分をそれぞれ E_{rp} , E_{rs} とおくと, Snell の法則より

$$\begin{pmatrix} E_{rp} \\ E_{rs} \end{pmatrix} = M_R \begin{pmatrix} E_{1p} \\ E_{1s} \end{pmatrix} \quad (14)$$

となる。ただし,

$$M_R = \begin{bmatrix} R_p & 0 \\ 0 & R_s \end{bmatrix} \quad (15)$$

ここで R_p と R_s は Fresnel 係数であり, 空気の屈折率を n_0 , 金属の複素屈折率を n_c として次式により計算される。

$$R_p = \frac{n_c \cos \theta_{in} - n_0 \cos \theta_c}{n_c \cos \theta_{in} + n_0 \cos \theta_c} \quad (16)$$

$$R_s = \frac{n_0 \cos \theta_{in} - n_c \cos \theta_c}{n_0 \cos \theta_{in} + n_c \cos \theta_c}$$

ただし, θ_c は複素屈折角で, 次式により求められる。

$$n_0 \sin \theta_{in} = n_c \sin \theta_c \quad (17)$$

E_{rp} と E_{rs} が P に作る電場を考える。一般に k_r は表面上の点によって向きが異なり, さらに k_2 とも向きが異なるため, E_{rp} と E_{rs} を単純に式(7)で足し合わせることはできない。そこで, 図 9 に示すように k_r と k_2 の両方を含む平面 $F(k_r, k_2)$ を考える。表面上の点 x での正反射光の偏光方向を取り直すことを考え, $F(k_r, k_2)$ の法線方向の単位ベクトルを $e_{r\perp}$, k_r と $e_{r\perp}$ の両方に垂直な方向の単位ベクトルを $e_{r\parallel}$ とおく。 $e_{r\perp}$ と $e_{r\parallel}$ の方向の電場の振幅をそれぞれ $E_{r\perp}$, $E_{r\parallel}$ とおく。P についても同様に $e_{2\perp}$, $e_{2\parallel}$, $E_{2\perp}$, $E_{2\parallel}$ を定める。

E_{rp} , E_{rs} と $E_{r\perp}$, $E_{r\parallel}$ の間には, 式 (12) と同様に考えて

$$\begin{pmatrix} E_{r\perp} \\ E_{r\parallel} \end{pmatrix} = M_{r\perp\parallel} \begin{pmatrix} E_{rp} \\ E_{rs} \end{pmatrix} \quad (18)$$

の関係がある。ここで $M_{r\perp\parallel}$ は次式により得られる。

$$M_{r\perp\parallel} = \begin{bmatrix} e_{r\perp}^T \\ e_{r\parallel}^T \end{bmatrix} \begin{bmatrix} e_{rp} & e_{rs} \end{bmatrix} \quad (19)$$

また, $\nabla E_{r\perp}$ と $\nabla E_{r\parallel}$ は Beckmann の理論と同様に考えて

$$\nabla E_{r\perp} = i k_r E_{r\perp}, \quad \nabla E_{r\parallel} = i k_r E_{r\parallel} \quad (20)$$

と求められる。

$E_{r\perp}$, $E_{2\perp}$, $E_{r\parallel}$ と $E_{2\parallel}$ の間には, それぞれ Kirchhoff の回折理論が適用できる。式 (8) に式 (10), (11), (18), (20) を代入すると, 以下の関係が成り立つ。

$$\begin{pmatrix} dE_{2\perp}(P, x) \\ dE_{2\parallel}(P, x) \end{pmatrix} = i \frac{e^{ik|D|-ik_2x}}{4\pi|D-x|} v \cdot n \begin{pmatrix} E_{r\perp} \\ E_{r\parallel} \end{pmatrix} d\Sigma \quad (21)$$

ただし

$$v = k_1 - k_2 \quad (22)$$

式 (21) の左辺の電場を e_{2A} の方向と e_{2B} の方向で取り直すと次式が得られる。

$$\begin{pmatrix} dE_{2A}(P, x) \\ dE_{2B}(P, x) \end{pmatrix} = M_{\perp\parallel 2} \begin{pmatrix} dE_{2\perp}(P, x) \\ dE_{2\parallel}(P, x) \end{pmatrix} \quad (23)$$

ここで $M_{\perp\parallel 2}$ は, $F(k_r, k_2)$ に沿った基底 $e_{2\perp}$, $e_{2\parallel}$ から, P で基準となる偏光方向 e_{2A} , e_{2B} への変換をあらわし, 次式により得られる。

$$M_{\perp\parallel 2} = \begin{bmatrix} e_{2A}^T \\ e_{2B}^T \end{bmatrix} \begin{bmatrix} e_{2\perp} & e_{2\parallel} \end{bmatrix} \quad (24)$$

最終的に計算する式は,

$$\begin{pmatrix} E_{2A}(P) \\ E_{2B}(P) \end{pmatrix} = \int_{\Sigma(\alpha)} \begin{pmatrix} dE_{2A}(P, x) \\ dE_{2B}(P, x) \end{pmatrix} \quad (25)$$

Fig.7 Wave vector and polarization direction of incident and reflected light

Fig.8 Wave vector and polarization direction on surface

Fig.9 Plane $F(k_r, k_2)$ and polarization direction of reflected light

式 (25) に, 式 (23), (21), (18), (14), (12) の順に代入すると, 次式が得られる。

$$\begin{pmatrix} E_{2A}(P) \\ E_{2B}(P) \end{pmatrix} = M \begin{pmatrix} E_{1A} \\ E_{1B} \end{pmatrix} \quad (26)$$

ただし, M は 2 行 2 列の行列で, 次式により得られる。

$$M = \frac{ie^{ik|D|}}{4\pi} \int_{\Sigma(\alpha)} M_{\perp\parallel 2} M_{r\perp\parallel} M_R M_{1r} \frac{v \cdot n e^{ivx}}{|D-x|} d\Sigma \quad (27)$$

最終的に, P での反射光の強度 $I_{out}(P, \alpha, \lambda)$ は

$$I_{out}(P, \alpha, \lambda) = |E_{2A}(P)|^2 + |E_{2B}(P)|^2 = \begin{pmatrix} \overline{E_{1A}} & \overline{E_{1B}} \end{pmatrix} M^* M \begin{pmatrix} E_{1A} \\ E_{1B} \end{pmatrix} \quad (28)$$

により得られる。ただし, M^* は M の随伴行列である。一般に, 加工面を観察するときの照明光には太陽光, 蛍光灯, LED 光などがあり, 偏光がない場合が多い。この場合の入射光の強度を $I_{in}(\lambda)$, 反射光の強度を $I_{out}(P, \alpha, \lambda)$ とおくと, 入射光の偏光方向について $I_{out}(P, \alpha, \lambda)$ を平均化することで次式が得られる。

$$\langle I_{out}(P, \alpha, \lambda) \rangle = \frac{\text{tr}(M^* M)}{2} I_{in}(\lambda) \quad (29)$$

3.3 マイクロファセットでの離散化

一般的な形状に対して式 (27) を計算することは困難であるため、2.2 節でモデリングをおこなった形状に適用することで計算を簡略化する。

まず 1 つのマイクロファセット $\Sigma_{i,j}$ で M を計算する。 $\Sigma_{i,j}$ 内では勾配および法線方向は一定であるため、式 (27) の積分計算の中で e^{ivx} と $|D-x|$ 以外は一定である。さらに x の変化量は D のスケールに比べ非常に小さい。例えば、観察距離 $|D|$ のスケールが数百 mm であるのに対し $\Sigma_{i,j}$ 内で x が変化する範囲のスケールは形状の空間分解能に相当し数 μm である。したがって、 $\Sigma_{i,j}$ 内で $|D-x|$ も一定であるとみなしてよい。

$\Sigma_{i,j}$ に対して計算した M を $M_{i,j}$ とおくと、次式により求められる。

$$M_{i,j} \approx \frac{v \cdot n_{i,j}}{4\pi|D-x_{i,j}|} M_{\perp\parallel 2} M_{r\perp\parallel} M_R M_{1r} \int_{\Sigma_{i,j}} e^{ivx} d\Sigma \quad (30)$$

ここで $n_{i,j}$ は $x_{i,j}$ での法線ベクトルである。

次に、画素 $Q(\alpha)$ について M を計算する。 M の積分範囲を $\Sigma(\alpha)$ とすればよいが、2.3 節で述べたように $\Sigma(\alpha)$ は $\Sigma_{i(\alpha),j(\alpha)}$ を組み合わせたものであるとみなしているため、次式のように計算できる。

$$M(\alpha) = \sum_{(i,j)=i(\alpha),j(\alpha)} M_{i,j} \quad (31)$$

したがって $I_{\text{out}}(P, \alpha, \lambda)$ を求めるには、まず式 (30) を用いて $M_{i,j}$ を計算し、次に式 (31) により $M(\alpha)$ を求め式 (28) に代入すればよい。本論文では偏光のない場合を考え、式 (29) により得られる $\langle I_{\text{out}}(P, \alpha, \lambda) \rangle$ を用いる。

4. 旋削面の評価に関するケーススタディ

4.1 目的

筆者らは、アルミニウム合金の旋削実験で加工条件が異なる面に対し官能評価を行い、加工条件によって「光沢あり」や「白っぽい」といった明確に異なる評価が得られることを報告した¹⁹⁾。ここでは、明確な評価が得られた加工面形状に対して、提案手法を適用し反射光の強度分布を計算した。さらにレーザ顕微鏡を用いて加工面を観察し、両者の考察を通じて官能評価の差を解析した。

4.2 旋削実験と測定

アルミニウム合金 A2017 の丸棒を外径旋削した。加工条件を表 1 に示す。回転数が 1800 min^{-1} で「光沢あり」という評価を受けた面 1 と、回転数が 83 min^{-1} で「白っぽい」という評価を受けた面 6 を解析対象とした。レーザ顕微鏡(空間分解能: $0.625 \mu\text{m}$, レーザ波長: 405 nm , 高さ測定分解能: $0.3 \mu\text{m}$)を用いて表面形状を測定し、表面を観察した。

図 10 に測定した形状を、図 11 にレーザ顕微鏡による観察画像を示す。図 10 の形状データでは、工具が通過してきた巨視的な山谷の形状がわかるが、観察画像に見られる微細な条痕を見出すことは難しい。これは、微細な条痕の深さがサブ μm スケールであり、巨視的な形状のスケールに比べ小さいことが原因である。その一方で、図 11 に示す観察画像では、面 1 に比べ面 6 の方が微細な条痕が多いことがわかる。

4.3 計算の方法と結果

反射光の強度分布を計算するにあたり、空間分解能は測定デ

Table 1 Cutting conditions for turning aluminum bar.

Workpiece diameter	40 mm
Tool	Mono crystal diamond, flat
Rotation speed	Sample 1 ('Glossy'): 1800 min^{-1} Sample 6 ('Cloudy'): 83 min^{-1}
Feed	0.08 mm/rev.
Depth of cut	Estimated to be 20-25 μm
Coolant	Dry

Fig.10 Measured surface shape of the turned Aluminum bar

Fig.11 Microscope image of the turned Aluminum bar

Fig.12 Calculated distribution of normalized intensity of reflected light

ータと合わせ $2L = 0.625 \mu\text{m}$ とした。また、波長はレーザ顕微鏡の光源に合わせ $\lambda = 405 \text{ nm}$ とした。入射光と反射光の方向について、レーザ顕微鏡では観察対象の真上から照明光が入射し、真上に反射した光を捉えている。したがって、シミュレーションでも加工面の法線方向から照明光が入射し法線方向に反射する場合を考慮し $\theta_0, \theta_1, \theta_2, \theta_3$ をすべて 0° とした。また簡単のため加工面は完全導体であると仮定し $R_p = -1, R_s = 1$ とした。

図 10 に示した形状データの各測定点 $x_{i,j}$ に対して、2.4 節で述べた行列 $M_{i,j}$ を計算し反射光の強度 $\langle I_{\text{out}} \rangle$ を求めた。完全に平坦な面 ($z = 0$) を同様の条件で観察したときの $\langle I_{\text{out}} \rangle$ を基準として規格化した。

図12に反射光の強度の計算結果を示す。同図より、面1では、反射光強度の高い箇所が比較的広い面に分布していることがわかる。それに対して面6では、反射光強度の低い箇所が線状に多く分布している。これは図11で観察された条痕と対応がみられるが、特に面6については図11(b)で想像される以上に強度が低い箇所が広い。

条痕が少ない場合は反射光強度が強く、映り込みなどから「光沢あり」と判定されることは容易に想像できる。「白っぽい」と判定される理由は不明であったが、計算結果から条痕に起因する反射光の少なさと関係していると考えられる。

5. 虹面の評価に関するケーススタディ

5.1 目的

一般に切削パターンが細かくなると、加工面が色づいて見えることが知られている。このような虹面の性質は、加工面の微視的な形状により光の回折と干渉が生じることが原因であることが知られている²⁰⁾。微視的な形状は肉眼では稜線としてとらえることができないため、虹面の官能評価は色を根拠にしていると考えられる。例えば、均一な微視的な性状をもつ虹面は、面内の異なる部分でも同じ照明・観察条件で観察した場合に同じ色に見えると予想される。ただし、色は観察する方向によって変化する。そこで、虹面を観察する方向の変化に対して色が変化する様子についてシミュレーションをおこない、画像と比較した。さらに、虹面の中の異なった位置をピックアップして、色が異なっているかを調査した。

5.2 ワークの加工と測定およびシミュレーション

加工実験により様々な加工条件の虹面を用意した。微細加工に携わる評価者に官能評価をしてもらい、「均一である」などの肯定的な評価を受けた加工面に注目した。表2に、扱った加工面の加工条件を示す。図13にワークの寸法と写真を示す。

虹面の形状データを得るため、白色干渉計（空間分解能：1.1 μm 、高さ測定分解能：0.01 nm）を用いて加工面形状を測定した。虹面のうち、図14に示す3箇所（測定位置1~3）を測定した。図15に測定位置1での形状の測定結果を示す。

分光エリブソメータ（入射角：70°、測定光エネルギー範囲：0.6-6.0 eV、測定間隔：0.02 eV）を用いて加工面の屈折率を測定した。図16に屈折率の測定結果を示す。図中の n と κ はそれぞれ複素屈折率 n_c の実部と虚部をあらわし、

$$n_c = n - i\kappa \quad (32)$$

である。

図17に撮影セットアップを示す。LEDの平行光光源を照明として用いた。ゴニオステージを用いて加工面の方向を変化させながら測定位置1の写真を撮影した。 $\theta_1 = 50^\circ$ 、 $\theta_2 = 40^\circ$ から $\theta_1 = 43^\circ$ 、 $\theta_2 = 47^\circ$ まで角度を変化させ、虹面の色が移り変わる様子を調べた。平行光光源の強度 $I_{in}(\lambda)$ は、分光放射照度計（測定波長間隔：1 nm）を用いて測定した。図18に測定結果を示す。

測定した形状、屈折率および照明光のデータを用いて視覚シミュレーションをおこなった。シミュレーション条件は写真撮影のセットアップに合わせ、表3に示すように設定した。

5.3 写真とシミュレーション結果の比較

撮影で得られた写真から、形状を測定した範囲を抽出しシミュレーション結果と比較した。

図19に、加工面の写真と色の計算結果の比較を示す。測定位置1での写真と計算結果、すなわち(a1)と(a2)、(b1)と(b2)、(c1)と(c2)を比較すると、観察する角度が変化するとともに色が移り

Table 2 Cutting conditions for iridescent surface

Workpiece material	STAVAX (52 HRC)
Tool	R1 2-tooth ball end-mill, Cemented carbide
Rotation speed	22000 min ⁻¹
Feed	200 mm/min
Pick feed	0.05 mm
Depth of cut	0.05 mm
Coolant	Oil mist

Fig.13 Schematic and photograph of iridescent sample

Fig.14 Positions of measured area on iridescent surface

Fig.15 Measured shape of area 1 of iridescent surface

Fig.16 Measured refractive index of iridescent surface

変わる傾向が一致している。

さらに、それぞれの照明・観察角度について、測定位置1~3での色の計算結果を比較すると、同様の色の分布が見られる。測定位置1~3はピック方向に異なる位置であり、広い面を写真に撮影すると図13(b)に示すように色が変わって見えるが、計算結果よりそれぞれに同様の反射特性をもつ微視的形状があることがわかる。このため「均一である」という評価を受けたと考えられる。官能評価では、評価者が頻繁に観察方向を変化させることが多いが、観察方向に対して色が敏感に変化することが影響している可能性がある。

6. 結 言

本論文では、機械加工面の官能指標を評価するため、Beckmannの散乱理論を応用し加工面の微視的な形状を含めて視覚情報を計算する視覚シミュレーション手法を提案した。得られた結果を以下にまとめる。

- (1) 提案手法を旋削加工面に適用し、加工面の形状から反射光強度を計算した結果、強度が低い箇所が、顕微鏡観察において微細な条痕が観察される箇所と合致した。かつ条痕が官能評価での判定原因になっていることが示唆された。
- (2) 提案手法を虹面に適用し、加工面形状から色を計算したところ、照明光の方向および観察方向によって色が変わる傾向が写真と一致した。かつ、官能評価で加工面が均一と判定された根拠に、色を利用している可能性があることが示唆された。

提案手法の利点は、照明光の入射方向と観察方向を自由に変化させ、波長に応じた反射光の強度分布を計算できる点にある。この利点を生かし、今後は、輝度の解析による光沢感の定量化や、色の解析による虹面の均一さの定量化に取り組む。

Fig.17 Method to change direction of iridescent surface

Fig.18 Measured light intensity of collimated LED light source

Table 3 Simulation conditions for iridescent surface	
Spatial resolution 2L	1.1 μm
Wavelength λ	380 to 780 nm in interval of 5 nm
Incidence direction	θ ₀ = 0°
Reflection direction	θ ₃ = 0°
Observation direction	250 mm

Fig.19 Photograph and simulated color distribution of iridescent surface

謝 辞

本研究は、一般財団法人 森記念製造技術研究財団の支援を受けて実施された。レーザ顕微鏡を用いた形状測定は、文部科学省ナノテクノロジープラットフォーム事業（京都大学微細加工プラットフォーム）の支援を受けて実施された。分光エリプソメータを用いた屈折率測定は、京都府中小企業技術センターの支援を受けて実施された。

付録 A 記号の一覧

論文中で用いた記号の一覧を示す。

$A_{i,j}$	: $\Sigma_{i,j}$ の x 方向の勾配
$B_{i,j}$	: $\Sigma_{i,j}$ の y 方向の勾配
d	: 投影面上の画素の間隔 μm
D	: P の位置ベクトル
$D(\alpha)$	: $\Sigma(\alpha)$ から P までの距離 mm
E	: 表面上での電場の振幅 N/C
E_{1A}	: 入射光の e_{1A} 方向の電場の振幅 N/C
E_{1B}	: 入射光の e_{1B} 方向の電場の振幅 N/C
E_{1p}	: 入射光の p 偏光方向の電場の振幅 N/C
E_{1s}	: 入射光の s 偏光方向の電場の振幅 N/C
E_{rp}	: 表面上での正反射光の p 偏光方向の電場の振幅 N/C
E_{rs}	: 表面上での正反射光の s 偏光方向の電場の振幅 N/C
$E_2(P)$	: P での反射光の電場の振幅 N/C
E_{2A}	: P での反射光の e_{2A} 方向の電場の振幅 N/C
E_{2B}	: P での反射光の e_{2B} 方向の電場の振幅 N/C
$E_{2\perp}$	: P での反射光の $e_{2\perp}$ 方向の電場の振幅 N/C
$E_{2\parallel}$	: P での反射光の $e_{2\parallel}$ 方向の電場の振幅 N/C
$E_{r\perp}$	: 表面上での正反射光の $e_{r\perp}$ 方向の電場の振幅 N/C
$E_{r\parallel}$	: 表面上での正反射光の $e_{r\parallel}$ の方向の電場の振幅 N/C
e_{1A}	: 入射光の偏光方向をあらわす単位ベクトル
e_{1B}	: 入射光の偏光方向で e_{1A} と直交する方向をあらわす単位ベクトル
e_{1p}	: 表面上での入射光の p 偏光の方向をあらわす単位ベクトル
e_{1s}	: 表面上での入射光の s 偏光の方向をあらわす単位ベクトル
e_{2A}	: 反射光の偏光方向をあらわす単位ベクトル
e_{2B}	: 反射光の偏光方向で e_{2A} と直交する方向をあらわす単位ベクトル
$e_{2\perp}$	: $F(k_r, k_2)$ の法線方向の単位ベクトル
$e_{2\parallel}$	: k_r と $e_{2\perp}$ の両方に垂直な方向の単位ベクトル
e_{rp}	: 表面上での正反射光の p 偏光の方向をあらわす単位ベクトル
e_{rs}	: 表面上での正反射光の s 偏光の方向をあらわす単位ベクトル
$e_{r\perp}$	: $F(k_r, k_2)$ の法線方向の単位ベクトル
$e_{r\parallel}$	: k_r と $e_{r\perp}$ の両方に垂直な方向の単位ベクトル

e_x	: x 方向の基底ベクトル
e_y	: y 方向の基底ベクトル
e_z	: z 方向の基底ベクトル
$F(k_r, k_2)$	: k_r と k_2 の両方を含む平面
$(i(\alpha), j(\alpha))$	: $x_{i,j}$ が $\Sigma(\alpha)$ に含まれるような (i, j) の組み合わせ
$I_{in}(\lambda)$	: 入射光の強度 $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{nm})$
$I_{out}(P, \alpha, \lambda)$	: $\Sigma(\alpha)$ から P に達した反射光の強度 $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{nm})$
k	: k_1 と k_2 の大きさ nm^{-1}
k_1	: 入射光の波数ベクトル
k_2	: 反射光の波数ベクトル
k_r	: 表面上での正反射光の波数ベクトル
$2L$	: 測定位置の間隔 μm
$L_e(\alpha, \lambda)$	: $\Sigma(\alpha)$ の分光放射輝度 $\text{W}/(\text{sr} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{nm})$
M	: E_{1A} , E_{1B} から E_{2A} , E_{2B} を計算する行列
$M(\alpha)$	: 画素 $Q(\alpha)$ について計算した M
M_{1r}	: E_{1A} , E_{1B} から E_{1p} , E_{1s} を計算する行列
$M_{i,j}$	: $\Sigma_{i,j}$ に対して計算した M
M_R	: E_{1p} , E_{1s} から E_{rp} , E_{rs} を計算する行列
$M_{r\perp\parallel}$	: E_{rp} , E_{rs} から $E_{r\perp}$, $E_{r\parallel}$ を計算する行列
$M_{\perp\parallel 2}$	: $E_{2\perp}$, $E_{2\parallel}$ から E_{2A} , E_{2B} を計算する行列
n	: ワークの複素屈折率の実部
n	: $\Sigma(\alpha)$ 上の法線ベクトル
n_0	: 空気の屈折率
n_c	: ワークの複素屈折率
$n_{i,j}$	: $x_{i,j}$ での法線ベクトル
$O-xyz$	: ワーク座標系
P	: 観察者の目の位置
$P-stu$	: 観察者座標系
$Q(\alpha)$	: α 番目の画素
$q_{i,j}$	: $x_{i,j}$ を投影面上に投影して作った点
R_p	: p 偏光についての Fresnel 係数
R_s	: s 偏光についての Fresnel 係数
v	: k_1 から k_2 を差し引いたもの
x	: 表面上の点の位置ベクトル
x_i	: 測定点の x 座標 mm
$x_{i,j}$	: 測定点の位置ベクトル
y_j	: 測定点の y 座標 mm
$z_{i,j}$	: 測定点の z 座標 mm
α	: 画素の番号
θ_c	: 複素屈折角
θ_{in}	: x での入射角
κ	: ワークの複素屈折率の虚部に -1 をかけたもの。消費係数
λ	: 光の波長 nm
$\Sigma(\alpha)$	: ワーク表面のうち $Q(\alpha)$ に投影される部分
$\Sigma_{\text{apparent}}(\alpha)$	: $\Sigma(\alpha)$ のみかけの面積 mm^2
$\Sigma_{i,j}$	: $x_{i,j}$ を中心とする微小平面
ϕ	: Green 関数

付録 B 投影における座標変換

2.3 節で述べた投影における基底ベクトルの変換と座標変換の計算過程を示す。

ワーク座標系から観察者座標系への基底ベクトルの変換は次式であらわされる。

$$[e_s \ e_t \ e_u] = [e_x \ e_y \ e_z] M_{wo} \quad (B.1)$$

ここで M_{wo} は基底の変換をあらわす行列で次式により求められる。

$$M_{wo} = Z \left(\theta_3 + \frac{\pi}{2} \right) X(\theta_2) Z(\theta_r) Z_{inv} \quad (B.2)$$

ただし、 X , Z はそれぞれ x , z 軸まわりの回転変換をあらわす行列で、次式により得られる。

$$X(\theta) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \theta & -\sin \theta \\ 0 & \sin \theta & \cos \theta \end{bmatrix} \quad (B.3)$$

$$Z(\theta) = \begin{bmatrix} \cos \theta & -\sin \theta & 0 \\ \sin \theta & \cos \theta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (B.4)$$

また、 Z_{inv} は z 軸方向の反転をあらわす行列であり次式により得られる。

$$Z_{inv} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & -1 \end{bmatrix} \quad (B.5)$$

θ_r は、 u 軸の負の方向から見て s 軸が xy 平面と平行な方向から反時計回りに何度傾いているかをあらわす。ワークを水平な台に置き、観察者が立って首を真っ直ぐにして見ている場合は $\theta_r = 0^\circ$ である。 $P-stu$ の基底の方向を左手系とするのは、観察距離が長くなる方向を u 軸の正の向きとするとわかりやすいからである。

ワーク表面上の測定点 $x_{i,j}$ を投影面上に投影したときの点 $q_{i,j}$ を

$$q_{i,j} = s_{i,j} e_s + t_{i,j} e_t + u_{i,j} e_u \quad (B.6)$$

とおく。観察者座標系でみたときの $x_{i,j}$ の座標を $({}^P x_{i,j}, {}^P y_{i,j}, {}^P z_{i,j})$ とおくと、

$$\begin{pmatrix} {}^P x_{i,j} \\ {}^P y_{i,j} \\ {}^P z_{i,j} \end{pmatrix} = M_{wo}^{-1} \begin{pmatrix} x_i \\ y_j \\ z_{i,j} \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ |D| \end{pmatrix} \quad (B.7)$$

投影の手法には主に透視投影と平行投影がある。本研究では平行投影を用いて次式により計算した。

$$s_{i,j} = {}^P x_{i,j}, \quad t_{i,j} = {}^P y_{i,j}, \quad u_{i,j} = |D| \quad (B.8)$$

参 考 文 献

- 1) F. Pernkopf et al.: Visual Inspection of Machined Metallic High-precision Surfaces, EURASIP J. Appl. Sig. P., 7 (2002) 667.
- 2) S. Martinez et al.: Quality Inspection of Machined Metal Parts Using an Image Fusion Technique, Measurement, 111 (2017) 374.
- 3) S. Chen et al.: Automated Inspection of Engineering Ceramic Grinding Surface Damage Based on Image Recognition" Int. J. Manu. Tech., 66 (2013) 431.
- 4) 酒井達雄, 酒井孝, 上野明: 金属材料の機械加工面性状の不規則性評価に関するフラクタル解析の適用, 日本機械学会論文集 (A 編), 64, 620 (1998) 1104.
- 5) X. Li, et al.: Machine-vision-based Surface Finish Inspection for Cutting Tool Replacement in Production," Int. J. Prod. Res., 42, 11, (2007) 2279.
- 6) 米原牧子, 木原幸一郎, 香川美仁, 磯野宏秋, 杉林俊雄: 5052 アルミニウム合金の光沢度および表面色に及ぼす凹凸形状の影響, 軽金属, 55, 1 (2005) 15.
- 7) 米原牧子: 表面性状パラメータを用いた質感の定量化手法, 精密工学会誌, 82, 11 (2016) 944.
- 8) 吉田瞬, 若林祐次, 川端康介, 杉林俊雄: 視覚因子による金属メッキ表面のテクスチャ評価, 拓殖大学理工学研究報告, 15, 1 (2018), 7.
- 9) 佐藤隆太: NC 工作機械の運動誤差を考慮した加工面シミュレーション技術, 精密工学会誌, 83, 3 (2017) 204.
- 10) R. L. Cook et al.: A Reflectance Model for Computer Graphics, ACM T. Graphic., 1, 1 (1982) 7.
- 11) P. Beckmann, and A. Spizzichino: The Scattering of Electromagnetic Waves from Rough Surfaces, Artech House, Inc., Norwood, M. A. (1987) 22.
- 12) 公益財団法人 画像情報教育振興協会: コンピュータグラフィックス 改訂新版, 公益財団法人 画像情報教育振興協会, (2015) 9.
- 13) D. R. Williams: Topography of the Foveal Cone Mosaic in the Living Human Eye, Vision Res., 28 (1988) 433.
- 14) 大田登: 色彩工学 第2版, 東京電機大学出版局 (2001) 20.
- 15) 鶴飼一彦, 花沢明俊, 古賀一男, 篠森敬三, 内川恵二, 佐藤雅之: 講座 感覚・知覚の科学 1 視覚 I - 視覚系の構造と初期機能 -, 朝倉書店 (2007) 27.
- 16) CIE 015: Colorimetry 4th edition, CIE Central Bureau, Vienna, (2018) 21.
- 17) IEC 61966-2-1: Multimedia systems and equipment-Colour measurement and management-Part 2-1: Colour management-Default RGB colour space-sRGB (1999) 23.
- 18) E. Hecht: Optics fifth edition, Pearson Education Ltd., Harlow, Essex (2017) 532.
- 19) 井原基博, 山路伊和夫, 松原厚: 切削加工面の評価方法に関する研究 (第1報) -A2017 旋削加工面の外観-, 2020 年度精密工学会春季大会学術講演会講演論文集 (2020) 584.
- 20) 藤本定正, 鮎沢隆, 巢山博美: にじ面の研究, 精密機械, 32, 6 (1966) 409.