

視覚シミュレーションによる切削加工面の官能指標の解析

2022

井原 基博

目次

目次	i
記号の説明	a
第1章 緒言	1
第2章 加工面評価の課題と官能指標の解析の方針.....	5
2.1 緒論	5
2.2 切削加工面の基本的な創成機構.....	5
2.3 主な定量評価方法と定量指標.....	7
2.4 切削加工面を用いた官能評価アンケート調査.....	9
2.4.1 調査の目的と方法.....	9
2.4.2 調査結果と官能指標の抽出.....	12
2.5 先行研究と課題.....	20
2.6 官能指標の解析の方針.....	21
2.7 結論	22
第3章 視覚シミュレーションの構築.....	24
3.1 緒論	24
3.2 視覚系の構造と視覚情報の処理および定量化.....	24
3.2.1 神経経路の構造と視覚情報の処理.....	24
3.2.2 輝度の定量化.....	30
3.2.3 色の定量化.....	32
3.3 CGの工程.....	34
3.3.1 デジタルカメラモデル.....	34
3.3.2 モデリング.....	34
3.3.3 投影	35
3.3.4 シェーディング.....	35
3.3.5 AD変換.....	37
3.4 視覚シミュレーション手法の構築.....	38
3.4.1 視覚シミュレーションの全体の流れ.....	38
3.4.2 モデリング.....	39
3.4.3 投影	40
3.4.4 シェーディング.....	43
3.4.5 輝度と色の計算.....	43
3.4.6 反射光の強度の計算過程.....	43
3.5 結論	49
第4章 光沢の度合いの解析.....	50

4.1	緒論	50
4.2	光沢の度合いの解析方法	50
4.2.1	反射輝度分布曲線	50
4.2.2	輝度対比弁別閾	53
4.3	旋削加工面の光沢の度合いの解析	53
4.3.1	実験の目的と方法	53
4.3.2	実験結果	54
4.3.3	視覚シミュレーションによる光沢の度合いの解析	59
4.3.4	光沢の度合いを変化させる加工面形状の特徴についての検討	68
4.4	ボールエンドミル加工面の光沢の度合いの解析	72
4.4.1	実験と調査の目的	72
4.4.2	切削実験	72
4.4.3	形状と屈折率の測定	74
4.4.4	視覚シミュレーションによる光沢の度合いの解析	75
4.4.5	官能評価アンケート調査	80
4.4.6	官能評価結果と解析結果の比較	80
4.4.7	光沢の度合いが異なる原因についての検討	82
4.5	結論	85
第5章	虹面の解析	87
5.1	緒論	87
5.2	虹面の色の均一さと鮮やかさの解析方法	88
5.3	虹面の色の均一さの解析	89
5.3.1	目的	89
5.3.2	加工面の測定と写真撮影および視覚シミュレーション	89
5.3.3	写真と視覚シミュレーション結果の比較	92
5.4	虹面の色の鮮やかさの解析	97
5.4.1	目的と方法	97
5.4.2	彩度の計算結果	97
5.4.3	官能評価アンケート調査と解析結果との比較	99
5.5	結論	100
第6章	切削模様の均一さの解析	101
6.1	緒論	101
6.2	切削模様の解析方法	102
6.2.1	2次元フーリエ変換による輝度の空間的コントラストの計算	102
6.2.2	ガボール変換による輝度分布の局所的な特徴の検出	104
6.3	切削実験と加工面の外観	108

6.4	加工面の測定と解析.....	111
6.4.1	形状測定と視覚シミュレーション.....	111
6.4.2	加工面 C の解析.....	116
6.4.3	加工面 D の解析.....	118
6.4.4	加工面 E の解析.....	121
6.4.5	3 種類の加工面の解析結果の比較.....	123
6.5	結論.....	124
第 7 章	結言.....	125
付録	.....	128
謝辞	.....	133
参考文献	.....	134
論文リスト	.....	139

記号の説明

記号	意味	単位
$A(s, t)$	: ガボール変換における元の画像データ	-
$A_{i,j}$	: $\Sigma_{i,j}$ の x 方向の勾配	-
a^*	: CIE L*a*b*表色系で用いるパラメータ	-
B	: sRGB 表色系で用いるパラメータ	-
$B_{i,j}$	: $\Sigma_{i,j}$ の y 方向の勾配	-
b^*	: CIE L*a*b*表色系で用いるパラメータ	-
C	: 輝度の空間的コントラスト	-
C^*	: 色の彩度をあらわすパラメータ	-
\bar{C}^*	: 平均の彩度	-
C_{\min}	: ある空間周波数の正弦波の縞模様を知覚できる最小の空間的コントラスト	-
\bar{C}_{\min}	: 輝度対比弁別閾	-
d	: 投影面上の画素の間隔	m
D	: P の位置ベクトル	各成分は m
$D(\alpha)$	: $\Sigma(\alpha)$ から P までの距離	m
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_{in}	: 分光放射照度	W/(m ² ·nm)
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	各成分は -
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	各成分は -

記号	意味	単位
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	各成分は -
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	各成分は -
e_{2A}	: 反射光の偏光方向をあらわす単位ベクトル	各成分は -
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	各成分は -
$e_{2\perp}$	: $F(\mathbf{k}_r, \mathbf{k}_2)$ の法線方向の単位ベクトル	各成分は -
$e_{2\parallel}$	: \mathbf{k}_r と $e_{2\perp}$ の両方に垂直な方向の単位ベクトル	各成分は -
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	各成分は -
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	各成分は -
$e_{r\perp}$	: $F(\mathbf{k}_r, \mathbf{k}_2)$ の法線方向の単位ベクトル	各成分は -
$e_{r\parallel}$	: \mathbf{k}_r と $e_{r\perp}$ の両方に垂直な方向の単位ベクトル	各成分は -
e_s	: s 方向の基底ベクトル	各成分は -
e_t	: t 方向の基底ベクトル	各成分は -
e_u	: u 方向の基底ベクトル	各成分は -
e_x	: x 方向の基底ベクトル	各成分は -
e_y	: y 方向の基底ベクトル	各成分は -
e_z	: z 方向の基底ベクトル	各成分は -
f	: 空間周波数	c/d
f_s	: s 軸方向の空間周波数	c/d
f_t	: t 軸方向の空間周波数	c/d
$F(\mathbf{k}_r, \mathbf{k}_2)$	: \mathbf{k}_r と \mathbf{k}_2 の両方を含む平面	-
G	: sRGB 表色系で用いるパラメータ	-
$G(s, t)$	: ガボール変換の結果	cd/m ²
$g(s, t, f, \theta_r, \sigma)$	: ガボールフィルタ	-
h	: 色の色相をあらわすパラメータ	°
\bar{h}	: 平均の色相	°
$(i(\alpha), j(\alpha))$	: $\mathbf{x}_{i,j}$ が $\Sigma(\alpha)$ に含まれるような (i, j) の組み合わせ	各成分は -
$I_{in}(\lambda)$	: 入射光の強度	W/(m ² ·nm)
$I_{out}(P, \alpha, \lambda)$	: $\Sigma(\alpha)$ から P に達した反射光の強度	W/(m ² ·nm)
K_m	: 最大視感度 683 lm/W	lm/W
k	: 波数	/m

記号	意味	単位
k_1	: 入射光の波数ベクトル	各成分は /m
k_2	: 反射光の波数ベクトル	各成分は /m
k_r	: 表面上での正反射光の波数ベクトル	各成分は /m
k_Y	: CIE XYZ 表色系における比例定数	sr·m ² /W
L	: 輝度	cd/m ²
$2L_{xy}$	: 測定位置の間隔	m
\bar{L}	: 平均の輝度	cd/m ²
L^*	: CIE L*a*b*表色系で用いるパラメータ	-
L_b	: 背景輝度	cd/m ²
$L_e(\lambda)$	: 分光放射輝度	W/(sr·m ² ·nm)
$L_e(\alpha, \lambda)$	: $\Sigma(\alpha)$ の分光放射輝度	W/(sr·m ² ·nm)
$L_{e,n}(\lambda)$	: 完全拡散反射面での分光放射輝度	W/(sr·m ² ·nm)
M	: E_{1A}, E_{1B} から E_{2A}, E_{2B} を計算する行列	各成分は -
$M(\alpha)$	: 画素 $Q(\alpha)$ について計算した M	各成分は -
M_{1r}	: E_{1A}, E_{1B} から E_{1p}, E_{1s} を計算する行列	各成分は -
$M_{i,j}$	: $\Sigma_{i,j}$ に対して計算した M	各成分は -
M_R	: E_{1p}, E_{1s} から E_{rp}, E_{rs} を計算する行列	各成分は -
$M_{r\perp\parallel}$	: E_{rp}, E_{rs} から $E_{r\perp}, E_{r\parallel}$ を計算する行列	各成分は -
M_{sRGB}	: 三刺激値 X, Y, Z から R, G, B に変換する際に用いる行列	各成分は -
M_{wo}	: ワーク座標系の基底から観察者座標系の基底への変換行列	各成分は -
$M_{\perp\parallel 2}$	: $E_{2\perp}, E_{2\parallel}$ から E_{2A}, E_{2B} を計算する行列	各成分は -
N_n	: 2.4 節の官能評価アンケート調査での否定的な判定の数	-
N_p	: 2.4 節の官能評価アンケート調査での肯定的な判定の数	-
n	: ワークの複素屈折率の実部	-
n	: $\Sigma(\alpha)$ 上の法線ベクトル	各成分は -
n_0	: 空気の屈折率	-
n_c	: 加工面の物質の複素屈折率	-
$n_{i,j}$	: $x_{i,j}$ での法線ベクトル	各成分は -
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	-
p	: 2.4 節の官能評価アンケート調査での肯定度合い	-
$Q(\alpha)$	: α 番目の画素	-

記号	意味	単位
$\mathbf{q}_{i,j}$	: $\mathbf{x}_{i,j}$ を投影面上に投影して作った点の位置ベクトル	各成分は m
R	: sRGB 表色系で用いるパラメータ	-
Ra	: 2次元形状での算術平均粗さ	m
Rz	: 2次元形状での最大高さ	m
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	-
$s_{i,j}$	: $\mathbf{q}_{i,j}$ の s 座標	m
Sa	: 3次元形状での算術平均高さ	m
Sz	: 3次元形状での最大高さ	m
$t_{i,j}$	: $\mathbf{q}_{i,j}$ の t 座標	m
$u_{i,j}$	: $\mathbf{q}_{i,j}$ の u 座標	m
$V(\lambda)$	: 明所視分光比視感度	-
\mathbf{v}	: \mathbf{k}_1 から \mathbf{k}_2 を差し引いたもの	各成分は /m
X	: CIE XYZ 表色系の三刺激値の1つ	-
X_n	: 完全拡散反射面に対する三刺激値 X	-
$\mathbf{X}(\theta)$	: x 軸まわりの基底の回転変換をあらわす行列	各成分は -
\mathbf{x}	: 表面上の点の位置ベクトル	各成分は m
$\bar{x}(\lambda)$	: CIE XYZ 表色系の等色関数	-
x_i	: 測定点の x 座標	m
$\mathbf{x}_{i,j}$	: 測定点の位置ベクトル	各成分は m
${}^P x_{i,j}$	: 観察者座標系での測定点 $\mathbf{x}_{i,j}$ の s 座標	m
Y	: CIE XYZ 表色系の三刺激値の1つ	-
Y_n	: 完全拡散反射面に対する三刺激値 Y	-
$\bar{y}(\lambda)$	: CIE XYZ 表色系の等色関数	-
y_j	: 測定点の y 座標	m
${}^P y_{i,j}$	: 観察者座標系での測定点 $\mathbf{x}_{i,j}$ の t 座標	m
Z	: CIE XYZ 表色系の三刺激値の1つ	-
Z_n	: 完全拡散反射面に対する三刺激値 Z	-
$\bar{z}(\lambda)$	: CIE XYZ 表色系の等色関数	-
$\mathbf{Z}(\theta)$	: z 軸まわりの基底の回転変換をあらわす行列	各成分は -
\mathbf{Z}_{inv}	: z 軸方向の反転をあらわす行列	各成分は -
$z_{i,j}$	: 測定点の z 座標	m
${}^P z_{i,j}$	: 観察者座標系での測定点 $\mathbf{x}_{i,j}$ の u 座標	m
α	: 画素の番号	-
θ_{in}	: \mathbf{x} での照明光の局所的な入射角	°

記号	意味	単位
θ_c	: 複素屈折角	°
θ_r	: ガボールフィルタの傾きをあらわすパラメータ	°
θ_0	: 照明光の波数ベクトルが xy 平面上で x 軸となす角	°
θ_1	: 照明光の波数ベクトルが z 軸となす角	°
θ_2	: 反射光の波数ベクトルが z 軸となす角	°
θ_3	: 反射光の波数ベクトルが xy 平面上で x 軸となす角	°
κ	: ワークの複素屈折率の虚部に-1 をかけたもの. 消衰係数	-
λ	: 光の波長	m
ξ	: ガボールフィルタに含まれる三角関数のパラメータ	m
$\Sigma(\alpha)$	: 加工面のうち $Q(\alpha)$ に投影される部分	-
$\Sigma_{\text{apparent}}(\alpha)$	: $\Sigma(\alpha)$ のみかけの面積	m ²
$\Sigma_{i,j}$	: $\mathbf{x}_{i,j}$ を中心とする微小平面	-
σ	: ガボールフィルタに含まれるガウス関数のパラメータ	°
ϕ	: Green 関数	-

第1章 緒言

切削加工により製品を製造するプロセスでは、まず使用者が機能と要求仕様を決定し設計をおこなう。加工者は図面にしたがって、加工に関する評価指標も考慮し加工条件を決定する。決定された加工条件パラメータを用いて実際に加工がおこなわれ、完成した製品が評価される。加工が終了した直後は加工者が良否を判定し、問題があれば加工条件パラメータにフィードバックし再び加工をおこなう。加工者による良否判定で問題がなければ、使用者が良否を判定し、問題があれば加工者に報告し、加工条件パラメータにフィードバックされ再び加工がおこなわれる。最終的に加工者と使用者の両方の判定で問題が無ければ、製造は完了する。図 1.1 に、特に製品の良否判定に注目した製造プロセスを示す。

このような製造プロセスを円滑に進めるためには、良否判定で用いる評価指標が定量的であることが重要である。評価指標が定量的で評価方法が客観的であれば、異なる使用者や加工者であっても評価結果は同じであり、加工条件の改善や問題解決に向けた議論およびその自動化が容易となる。特に切削加工面の評価に関しては、代表的な定量指標として寸法精度[1]、形状精度[2]、表面粗さ[3]が規格に定められている。加工条件の改善の自動化に向けた研究の例として、Oktem ら[4]は、エンドミル加工において表面粗さが最小となるように加工条件を決定する手法を構築している。Mia ら[5]は、表面粗さに加えて材料除去率、工具摩耗などを定量指標として、旋削の加工条件を最適化する手法を提案している。Umoh らは[6]、旋削加工面の表面粗さの他に工具摩耗および工具寿命を考慮して加工条件を決定する手法を提案している。Yamashita ら[7]は、炭素繊維強化プラスチックのエンドミル加工において、表面粗さだけでなく加工反力や温度にも着目し加工条件を決定する手法について述べている。

しかしながら現状の製造プロセスでは、切削加工面の良否判定には定量指標だけでなく、評価者の感覚に基づいた指標（官能指標）も用いられる。ISO25178-73[8]では、cosmetic defect が「visible defect which is also an ineffective defect」（視認可能で要求仕様を外れないような欠陥、ISO25178-73, 2019[8], p. 3, 3 行目）として定義されている。官能指標の中には、単純に感覚に関する言葉のみで表現されるものもあれば、製品の性能や加工状態に言及するものもある。官能指標は物理的でなく主観的であり言語化されていないこともあるため、図面や加工条件決定の段階で明示されないことが多い。測定方法を客観的に決定することが難しいため、評価する際には感覚に基づいた評価（官能評価）がおこなわれる。官能評価の方法は主観的で評価者によって異なる。特に切削加工面を目視により官能評価する場合には、評価者によって観察方法は様々であり、評価結果も主観や加工経験によって異なる。

官能評価自体は、製造プロセスの効率向上にとって重要である。定量評価には一般に測定器が必要であるためコストが費やされる。また、測定器で測定できる物理量や面積は限られており、加工面の全面積のすべての物理量を測定することは現実的でない。それに対して、官能評価は定量評価ほどの精度をもたないものの、加工面の明らかな、または局所的な不良

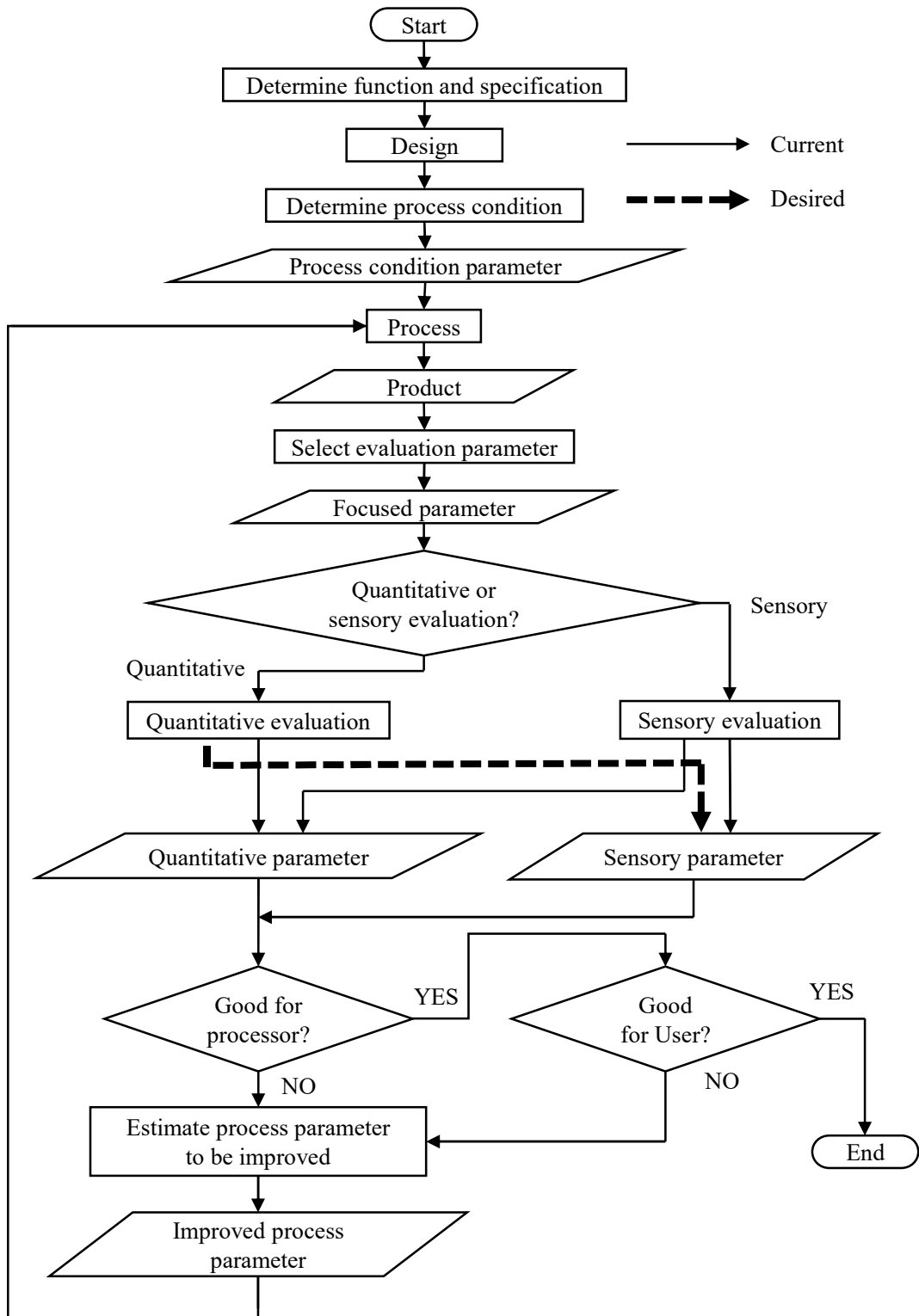


Fig. 1.1 Current production process

を発見する上で効率が良い。実際に熟練技術者は、官能評価により加工中の機械振動、工具摩耗、加工機の状態や製品の性能を評価し、加工不良の解決や製造プロセスの効率向上を図っている場合がある[9]。

官能指標が官能評価でしか評価できないことは、製造プロセスを円滑に進めるうえで大きな課題である。官能指標に関する要求仕様が言語化されず図面に明示されないため、加工者は使用者の要求仕様すべてを考慮することができない。加工者が加工条件を検討する際、官能指標を明示できず、加工条件との相関関係も明らかでないため最適な加工条件パラメータを選定することができない。加工後の官能評価では、評価者によって官能評価の方法と良否の判定結果が異なることがある。このため不良が発見されたときに評価者間で評価結果を共有することが難しくなり、加工条件パラメータへのフィードバックが困難となる。そこで、官能指標を定量的に解析する方法を確立することが、製造プロセスの円滑化のために求められている。さらに、このような方法が確立されれば、熟練に時間とコストを費やすことなく不良を発見し解決できる技術が実現でき、製造プロセスの効率を向上させられる可能性がある。

官能指標には、大きく分けて2通りがある。1つ目は感覚的な情報のみに基づき、加工状態や性能は考慮されずに評価される指標であり、2つ目は感覚的な情報から加工状態や製品の性能を推定して得られる指標である。切削加工面での例としては、前者には光沢の度合いや虹面の色[10]など、後者には切削状態の良否や加工振動の有無などがあると考えられる。両者では共通して感覚的な情報を用いているが、後者ではさらに、感覚的な情報と加工状態との因果関係、または性能との相関関係を、経験や物理的な知見を用いて推定していると考えられる。本研究では、官能指標を定量的に評価する基本問題として前者に注目する。

目視による切削加工面の官能評価において、加工面は物理的な過程で評価者に光を発生し、評価者は感受した光を心理物理 (Psychophysics) 的な過程により視覚に関する感覚的な情報に変換した上で、感覚的な情報を処理していると考えられる。そこで、官能指標を定量的に評価する方法は2つに大別される。1つ目は、上述の物理的または心理物理的な過程を考慮しない方法であり、2つ目はモデル化する方法である。前者では、官能指標と加工条件パラメータ・性能との関係を経験的に学習する必要があり、膨大な量の経験が必要となる。後者では、経験の量は比較的少なく済むと考えられ、未知の加工条件パラメータについて物理的な知見を適用すれば、経験則よりも正確な予測ができると期待される。さらに、加工における物理的な過程を正確に予測できた場合、加工シミュレーション結果を基に官能指標を予測することができる。本研究では感覚的な情報のみを用いた官能指標に注目するが、官能評価のモデルと加工現象のシミュレーションを組み合わせることにより、加工状態や性能の評価にも応用できる可能性がある。

本研究では、切削加工面を目視により良否判定する際の官能指標を解析することを目的とする。切削加工面上で反射した光が評価者の肉眼に達し、心理物理的な過程で視覚情報に変換される過程をモデル化する。加工面の測定データを用いて代表的な官能指標を定量化

し、官能評価結果と比較する。この方法により官能評価を客観的にとらえ説明する。

本論文の構成は以下の通りである。第2章では、加工面評価の現状と問題点について具体的に述べる。まず切削加工面の基本的な創成機構を述べ、主な定量指標を挙げる。次に、代表的な官能指標を官能評価アンケートにより明らかにする。官能指標に関する先行研究をまとめ課題を指摘し、本研究で官能指標を解析する方針を述べる。第3章では、官能評価における物理的・心理物理的過程をモデル化した、視覚シミュレーション手法を構築する。第4章では光沢の度合いの解析方法について述べ、ケーススタディとして旋削加工面とボールエンドミル加工面の評価をおこなう。第5章では虹面の色の解析方法について述べ、ボールエンドミルで加工した虹面の色の均一さと鮮やかさを評価する。第6章では、視覚系の空間周波数に対するフィルタを数学的に仮定して切削模様の均一さを評価できるかを検討する。第7章は、本研究の成果をまとめた結言である。

第2章 加工面評価の課題と官能指標の解析の方針

2.1 緒論

本章では、加工面評価の現状と課題をまとめ官能指標の解析の方針を示す。まず切削加工面の基本的な創成機構と定量評価手法、および定量指標を整理する。次に、良否判定の結果と定量指標の相関関係、また代表的な官能指標を調査するため、切削加工面を用いた官能評価アンケート調査をおこなう。先行研究での課題をまとめ、官能指標を解析する方針を示す。

本章の構成は次の通りである。2.2節では、切削加工面の基本的な創成機構を述べる。2.3節では、加工面の主な定量評価方法と定量指標をまとめ、その問題点を指摘する。2.4節では、表面粗さと良否の相関関係を調査するための官能評価アンケートについて述べる。2.5節では官能指標の解析に関する先行研究についてまとめ、課題を指摘する。2.6節では官能指標を解析する方針を明らかにする。2.7節は、本章の内容をまとめた結論である。

2.2 切削加工面の基本的な創成機構

切削加工では、工具と被削材が相対運動し、塑性変形により被削材が除去される。相対運動の種類は様々であり、例えば旋削加工では回転する被削材に対し工具を並進運動させる。エンドミル加工では、回転する工具に対し被削材が並進運動する。他にも、工具と被削材両方が回転または並進運動する場合もある。

図 2.1 に、例としてボールエンドミルを用いた切削加工と加工面形状の模式図を示す。工具の並進運動（送り運動）が正確で、かつ刃先形状が滑らかであり、さらに切削状態が理想的で塑性流動などの現象が無視できるならば、工具の運動方向に対して垂直な方向の刃先稜線は加工面に転写されると考えられる。このとき加工面は、規則的な巨視的形状（カスパ形状）をもつことになる。カスパ形状は切削条件により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。刃先形状と工具の運動が決まれば、カスパ形状を予測することができる。岩部らは、ボールエンドミル[11]およびラジラスエンドミル[12]を用いた切削加工において、加工面のカスパ形状を 3 次元 CAD により予測する手法を確立している。

切削加工では工具の運動軌跡と刃先形状、さらに塑性流動などの切削現象が加工面形状に影響する。工具軌跡に誤差がある場合、図 2.2 に示すように、加工面には理想のカスパ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やうねりとして認識される。加工機の振動や運動軌跡の誤差と加工面の外観に関する研究例として、Paris ら[13]は、びびり振動が生じた時の加工面形状を予測し、加工実験により実証している。また尾崎ら[14]は、びびり振動が生じた時の加工面の切削模様から、びびり振動周波数を推定する手法を構築している。

工具刃先稜線にはサブ μm オーダの微細な凹凸があり、塑性流動などの切削現象とともに加工面の微視的な形状に影響するため、工具刃先の運動が正確であっても加工面には微視

微視的な形状が形成される。図 2.3 に、微視的な形状を含んだカusp形状の模式図を示す。微視的な形状は凹凸としてより、光沢や色などの特徴として認識される。このような巨視的な形状と微視的な形状を総合して加工面を評価する必要がある。

微視的な形状を含む加工面形状の予測に関連した研究として、工具刃先の微細な凹凸については、Denkena ら[15]は工具の刃先形状を測定し、カusp形状に加えて微視的な形状までを考慮し加工面形状を予測するシミュレーション手法を開発している。切削現象については、切りくずの生成機構には流れ型、せん断型、き裂型、むしれ型があり、工具と被削材の組み合わせ、切削速度や切込み深さなどの加工条件によって変化することが知られている[16]。切削現象では材料の大変形を考慮する必要があるため、Ruttinmann ら[17]や Madaj ら[18]は、SPH (Smoothed Particle Hydrodynamics) 法により切削中の被削材内の応力分布や切りくずの生成を予測する手法を構築している。

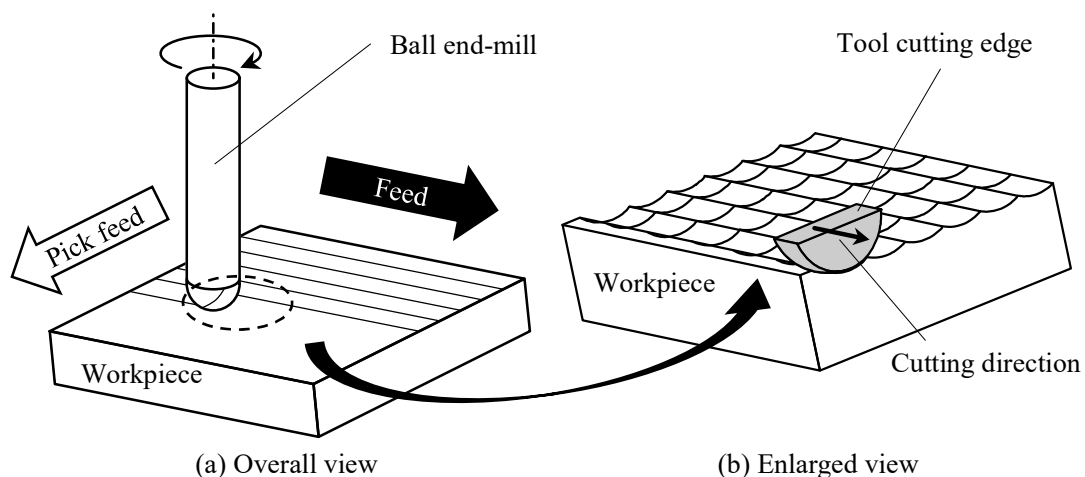


Fig. 2.1 Cusp shape generation in cutting process using ball end-mill

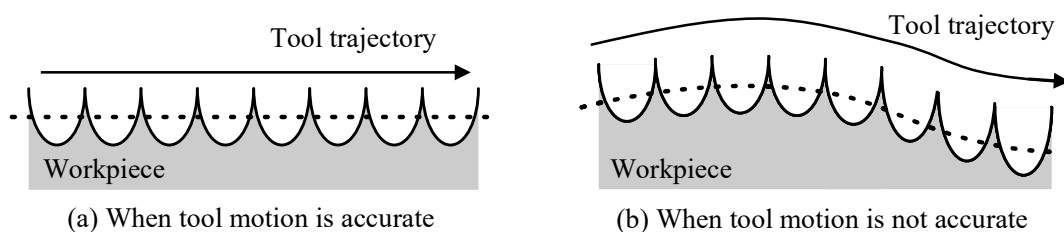


Fig. 2.2 Tool trajectory and surface shape

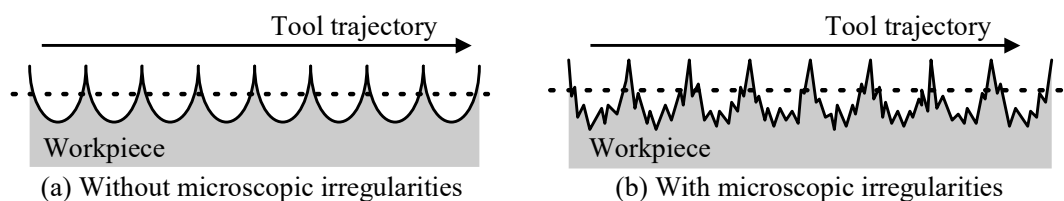


Fig. 2.3 Cusp shape with and without microscopic irregularities

2.3 主な定量評価方法と定量指標

切削加工面を定量評価する最も一般的な方法は、測定器を用いて形状を測定し、形状データから定量指標を計算して表面性状を表現する方法である。

形状を測定する代表的な装置として以下のようなものがある。測定装置ごとに測定原理、空間分解能、高さの測定精度・分解能は異なるが、測定結果として測定点ごとの高さが得られるという点では共通している。

(a) 表面粗さ計

表面上で触針を一定の荷重の下で走査させることにより形状を測定する。2.2節で述べたカusp形状と微視的な形状の両方を測定できる可能性がある。1回の走査では断面形状のデータしか測定できず、3次元の形状データを取得するには膨大な時間が必要となる。表面の凹部の曲率が触針径より小さい場合は、触針が凹部に入りきらないため正確に測定できないことがある。

(b) レーザポイントフォーカス式測定器 [19]

レーザプローブを加工面上で走査させ、常にレーザの焦点が合うように上下させることで、測定点での高さを得る。表面粗さ計と同様にプローブを走査させ断面形状を測定するため、3次元の形状データを取得するには走査回数が多くなり測定に必要な時間が長くなる。レーザのスポット径より小さいスケールの微視的な形状は正確に測定できない。

(c) 共焦点式レーザ顕微鏡 [20]

レーザ光を測定対象に照射し、反射光を撮像素子で検出する。反射光をピンホールに通すことで、測定対象のうち焦点が合う高さの部分のみが明るく検出される。焦点高さを変化させることで、各点での相対的な高さが求められる。比較的短時間で3次元形状データが得られる。空間分解能は、撮像素子の解像度とレンズ光学系の倍率に依存する。

(d) 白色干渉計 [21]

白色光を対象物に照射し反射させる。反射光と参照光が干渉して得られた光の強度から、対象物の高さを計算し3次元形状データを取得する。空間分解能は、撮像素子の解像度とレンズ光学系の倍率に依存する。

代表的な定量指標は、形状精度、寸法精度、表面粗さであるが、特に表面性状を評価する際に用いられる指標は表面粗さである。表面粗さの代表的なパラメータとしては、2次元の断面形状の場合は Rz 、 Ra などがあり、ISO 4287 [3]に定められている。図 2.4 に示すように、測定で得られた表面の断面形状（断面曲線、primary profile）から、波長の長い成分（表面うねり、surface waviness）を取り除くことで粗さ曲線（roughness curve） $z(x)$ を求める。

粗さ曲線のうち、基準長さ lr の分を抜き出したとき、 Rz は粗さ曲線の最大の高低差として、 Ra は粗さ曲線を平均化して得られる。3次元形状の場合は Sz , Sa などが ISO25178-2 [22]に定められており、それぞれ Rz , Ra と同様の手順で、評価する表面の領域 S における高さの分布 $z(x,y)$ から計算される。表 2.1 に以上のパラメータの計算式を示す。

表面粗さを官能指標の解析に応用するには、次のような問題点が予想される。切削加工面の官能指標には、2.2節で述べた創成機構が関係していると考えられる。このため、工具の送り方向、切削方向に注意しながら巨視的および微視的な形状を考慮する必要があると考えられる。しかしながら、表 2.1 に示したような表面粗さのパラメータの計算方法には表面の方向性は考慮されていない。 Rz と Ra は断面形状から計算されるため、評価結果が断面の方向に依存する。例えば、切削方向や送り方向、ピックフィード方向のうちどの断面を測定するかによって評価結果は異なると考えられる。また、 Sz と Sa を計算する場合は断面を選択する必要は無いが、加工面形状の異方性を表現できない。さらに、いずれのパラメータでも加工面の巨視的・微視的な形状を考慮していない。

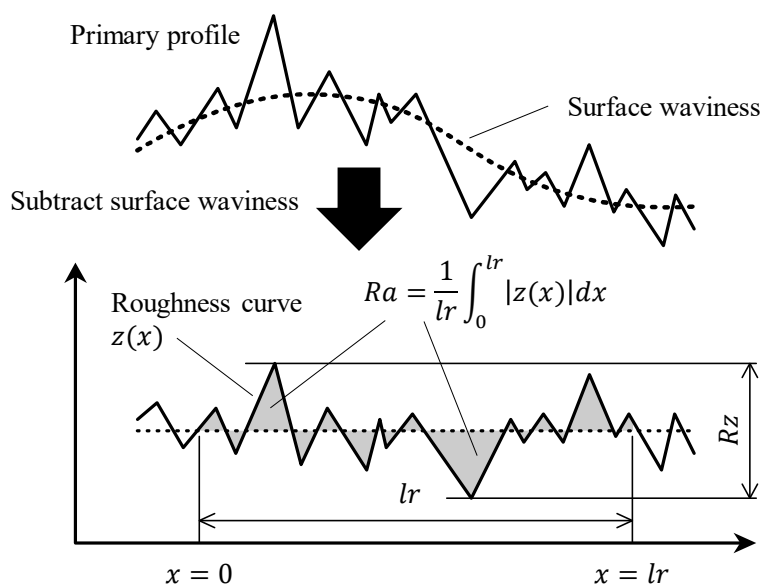


Fig. 2.4 Definition of surface roughness Rz and Ra

Table 2.1 Definition of surface roughness parameters [3][22]

	Symbol	Formula
2 Dimensional	Rz	$\max(z(x)) - \min(z(x))$
	Ra	$Ra = \frac{1}{L} \int_0^{lr} |z(x)| dx$
3 Dimensional	Sz	$\max(z(x,y)) - \min(z(x,y))$
	Sa	$Sa = \frac{1}{S} \iint_S |z(x,y)| dx dy$

2.4 切削加工面を用いた官能評価アンケート調査

2.4.1 調査の目的と方法

前節では、表面粗さを官能評価に応用する際に予想される問題点を指摘した。実際に表面粗さと良否の間に相関関係があるか、また代表的な官能指標を明らかにするため、切削加工面を用いた官能評価アンケート調査をおこなった。

まず官能評価に用いる加工面サンプルを用意するため、切削実験をおこなった。図 2.5 に加工面サンプルの寸法および切削パスの概略を示す。図中に灰色で示した 45°の斜面をボールエンドミルにより切削した。ダウンカットかけ下がりの切削パスで回転数を一定とし、様々な送り速度とピックフィードの組み合わせで加工をおこない 15 個のサンプルを用意した。表 2.2 に共通の加工条件を、表 2.3 に送り速度とピックフィードの組み合わせを示す。各欄に記された数字はサンプルの番号をあらわす。サンプル 1 番と 2 番の加工条件は同じであり、同じ型番の異なる工具を用いて加工した。

サンプルの表面形状をそれぞれ 3 箇所ずつ白色干渉計により測定し、表面粗さ Sa を求めた。表 2.4 に測定条件を示す。

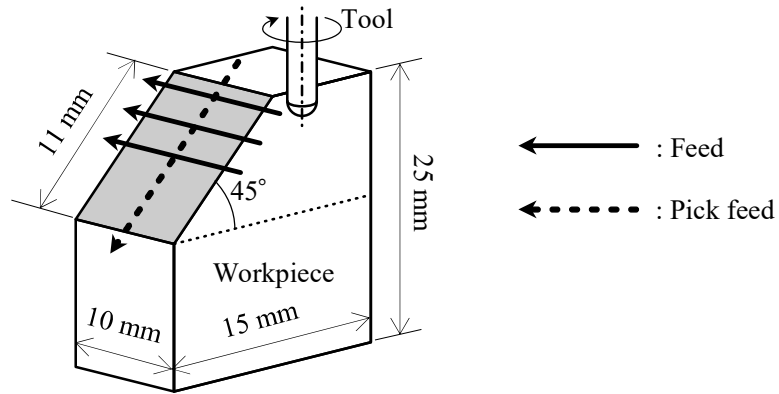


Fig. 2.5 Dimension of samples prepared for sensory evaluation questionnaire

Table 2.2 Common cutting conditions of samples prepared for sensory evaluation questionnaire

Workpiece material	STAVAX (52 HRC)
Tool	2-tooth ball end-mill, radius: 1 mm
Tool material	Coated cemented carbide
Rotation speed	22,000 min ⁻¹
Depth of cut	0.05 mm
Coolant	Oil mist

Table 2.3 Combinations of feed and pick feed of samples prepared for sensory evaluation questionnaire

		Pick feed mm				
		0.2	0.15	0.1	0.05	0.01
Feed mm/min (Feed per tooth mm)	4000 (0.091)				No. 7	
	3000 (0.068)	No. 12			No. 9	No. 14
	2000 (0.045)			No. 13	No. 8	
	1000 (0.023)	No. 4	No. 5	No. 3	No. 1, 2	No. 6
	500 (0.011)				No. 11	
	200 (0.005)				No. 10	No. 15

Table 2.4 Measurement conditions of white-light interferometer for samples prepared for sensory evaluation questionnaire

Measurement area size	0.3 mm × 0.3 mm
Measurement height resolution	0.01 nm
Spatial resolution	0.2 μm

官能評価アンケートでは、微細加工に携わる技術者や研究者、ビジネスマン 42 名を対象として、目視によりサンプルの良否を判定させた。「良い」や「好き」といった肯定的な印象をもつサンプルと、「悪い」や「嫌い」といった否定的な印象をもつサンプルをそれぞれ 3 個ずつ判定させた。図 2.6 にセットアップの写真を示す。このアンケートは展示場でおこなわれており、同図の上部に光源が固定されているが、写真に写っていない光源もあった。また同図ではサンプルがプラスチックケースに並べられ台の上に置かれているが、観察方法には制限を設けなかったため、評価者によってプラスチックケースに触れず自身の姿勢を変化させながら観察する場合や、ケースを持ち上げてサンプルの方向を変化させて観察する場合があった。

良否判定の根拠となる官能指標を調べるため、評価者にはそれぞれの判定の理由を可能な限り記述してもらった。良否の判定をしなかったサンプルについても自由にコメントを記述してもらった。

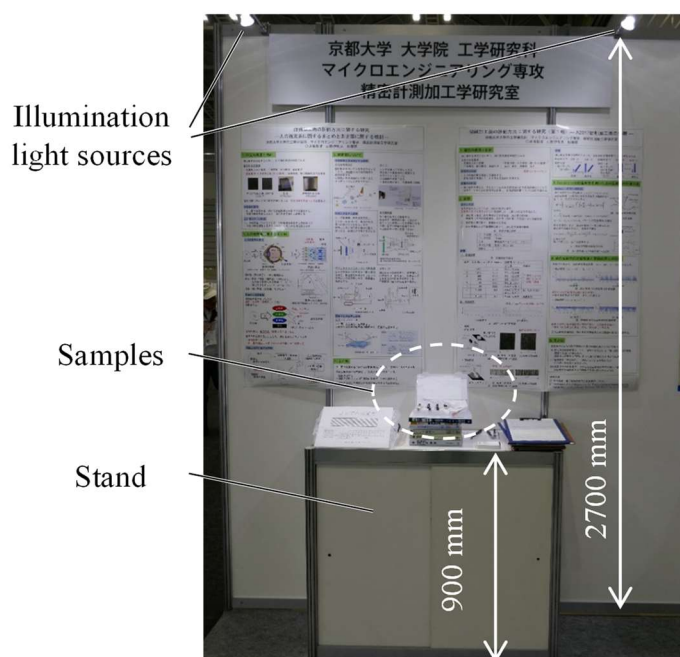


Fig. 2.6 Setup for sensory evaluation questionnaire

2.4.2 調査結果と官能指標の抽出

加工面サンプルごとに肯定的, 否定的な判定をおこなった評価者の数をそれぞれ N_p , N_n としてまとめた. 表2.5に, 加工面サンプルそれぞれの N_p , N_n の結果を示す. また図2.7~2.21にそれぞれ1番から15番までのサンプルの写真を示す. また表2.6~2.20に, 各サンプルに対して得られたコメントのうち代表的なものを示す. コメントの全文は付録に示す. コメントはすべて日本語で書かれており, 筆者が英語に訳した. Positive の欄にあるコメントは肯定的な判定の理由であり, Negative の欄にあるコメントは否定的な判定の理由である.

Table 2.5 Number of positive and negative judgements
for each workpiece in sensory evaluation questionnaire

		Pick feed mm				
		0.2	0.15	0.1	0.05	0.01
Feed mm/min (Feed per tooth mm)	4000 (0.091)				<u>No. 7</u> $N_p = 0,$ $N_n = 9$	
	3000 (0.068)	<u>No. 12</u> $N_p = 4,$ $N_n = 13$			<u>No. 9</u> $N_p = 2,$ $N_n = 7$	<u>No. 14</u> $N_p = 7,$ $N_n = 5$
	2000 (0.045)			<u>No. 13</u> $N_p = 10,$ $N_n = 1$	<u>No. 8</u> $N_p = 2,$ $N_n = 6$	
	1000 (0.023)	<u>No. 4</u> $N_p = 0,$ $N_n = 27$	<u>No. 5</u> $N_p = 9,$ $N_n = 2$	<u>No. 3</u> $N_p = 1,$ $N_n = 5$	<u>No. 1</u> $N_p = 1,$ $N_n = 6$ <u>No. 2</u> $N_p = 1,$ $N_n = 9$	<u>No. 6</u> $N_p = 1,$ $N_n = 7$
	500 (0.011)				<u>No. 11</u> $N_p = 20,$ $N_n = 0$	
	200 (0.005)				<u>No. 10</u> $N_p = 17,$ $N_n = 0$	<u>No. 15</u> $N_p = 24,$ $N_n = 0$

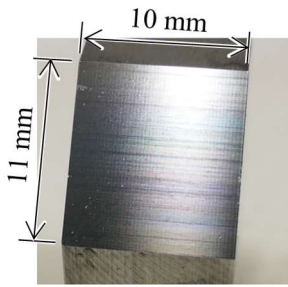


Fig.2.7 Photograph of sample No. 1

Table 2.6 Comments for sample No. 1

Positive	(No comment)
$(N_p = 1)$	
Negative	スジが見える.
$(N_n = 6)$	Horizontal stripes can be seen.

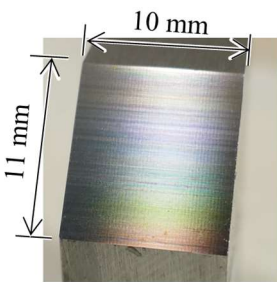


Fig. 2.8 Photograph of sample No. 2

Table 2.7 Comments for sample No. 2

Positive	(No comment)
$(N_p = 1)$	
Negative	均一じゃない. Not uniform.
$(N_n = 9)$	切削マークの間隔が不均一. Interval of cutter marks is not uniform.

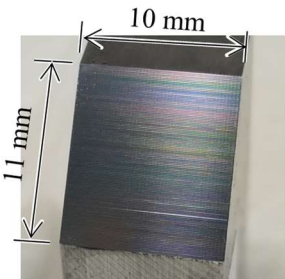


Fig. 2.9 Photograph of sample No. 3

Table 2.8 Comments for sample No. 3

Positive	(No comment)
$(N_p = 1)$	
Negative	きもち悪い.
$(N_n = 5)$	Not comfortable.

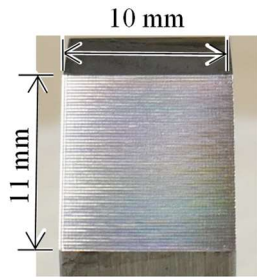


Fig. 2.10 Photograph of sample No. 4

Table 2.9 Comments for sample No. 4

Positive	(No positive judgement)
$(N_p = 0)$	
Negative	粗さが悪いだけでなく切削面がななめ
$(N_n = 27)$	になっている。 Not only roughness is bad, the surface looks slanted. 加工時の振動・工具の問題で、うねりのようなものがみえる。 Something like waviness caused by cutting vibration or tool.

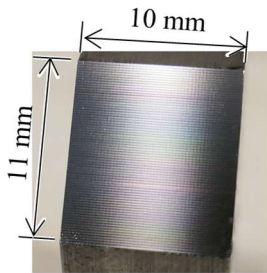


Fig. 2.11 Photograph of sample No. 5

Table 2.10 Comments for sample No. 5

Positive	ピックが少々荒いが面は均一。
$(N_p = 9)$	Pick feed is a little large, but the surface is uniform. すじが均一。気にならない。 Stripes are constant and not annoying.
Negative	(No comment)
$(N_n = 2)$	

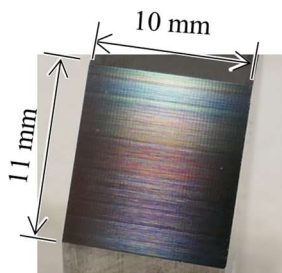


Fig. 2.12 Photograph of sample No. 6

Table 2.11 Comments for sample No. 6

Positive	(No comment)
$(N_p = 1)$	
Negative	切削マークの間隔が不均一。
$(N_n = 7)$	Interval of cutting marks is not uniform. ノイジー。 Noisy.

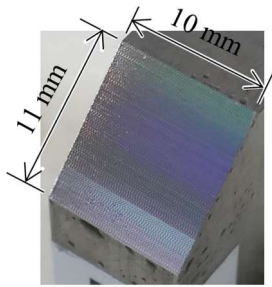


Fig. 2.13 Photograph of sample No. 7

Table 2.12 Comments for sample No. 7	
Positive	(No positive judgement)
$(N_p = 0)$	
Negative	ピックのうろこ目が見える.
$(N_n = 9)$	Periodic pattern caused by pick feed can be seen.
	ゆがんでいる 線が入っている.
	Surface looks distorted and contains stripes.

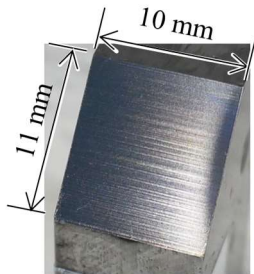


Fig. 2.14 Photograph of sample No. 8

Table 2.13 Comments for sample No. 8	
Positive	最も光を反射して、美しく見えた.
$(N_p = 2)$	It reflects illumination light the most, and looks beautiful.
Negative	切削マークの間隔が不均一.
$(N_n = 6)$	Interval of cutting marks is not uniform.

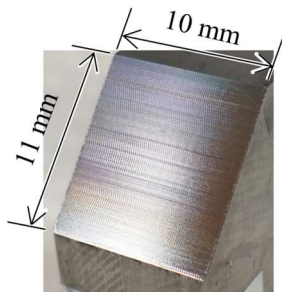


Fig. 2.15 Photograph of sample No. 9

Table 2.14 Comments for sample No. 9	
Positive	(No comment)
$(N_p = 2)$	
Negative	細かいけど虹色.
$(N_n = 7)$	Pattern looks fine but iridescent.
	まだらに見える.
	Looks mottled.

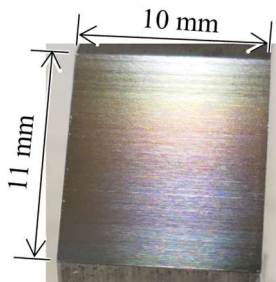


Fig. 2.16 Photograph of sample No. 10

Table 2.15 Comments for sample No. 10	
Positive	パスが均一.
$(N_p = 17)$	Cutting path looks uniform.
	光の反射にムラがない.
	Light reflection is uniform.
Negative	(No negative judgement)
$(N_n = 0)$	

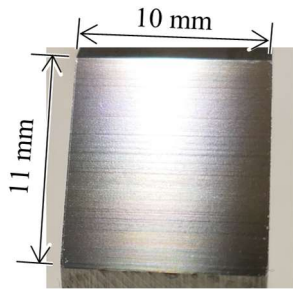


Fig. 2.17 Photograph of sample No. 11

Table 2.16 Comments for sample No. 11

Positive	スジが目立たない.
($N_p = 20$)	Stripes are not very visible. キソク正しい. Regular pattern.
Negative	(No negative judgement)
($N_n = 0$)	

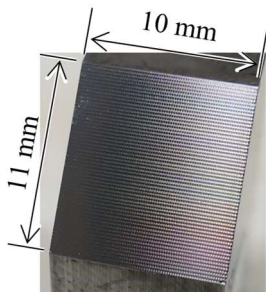


Fig. 2.18 Photograph of sample No. 12

Table 2.17 Comments for sample No. 12

Positive	目がそろってる気がする.
($N_p = 4$)	Pattern is seemingly uniform.
Negative	大きい間かくの線が見える.
($N_n = 13$)	Stripes in large interval.

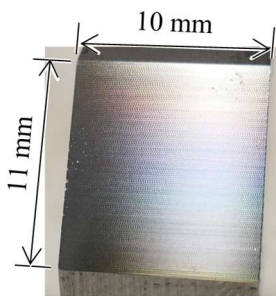


Fig. 2.19 Photograph of sample No. 13

Table 2.18 Comments for sample No. 13

Positive	(刃の入りが均一でないけど) 比較的
($N_p = 10$)	均一. 横も縦も. Even though cutter marks are not uniform, both vertical and horizontal patterns are relatively uniform.
Negative	△ヒラ?
($N_n = 1$)	Flat cutting?

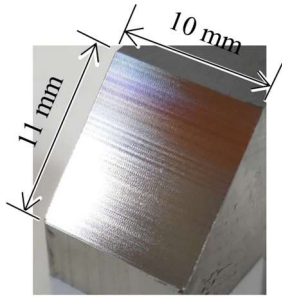


Fig. 2.20 Photograph of sample No. 14

Table 2.19 Comments for sample No. 14

Positive (No comment)

($N_p = 7$)

Negative 不ぞろい.

($N_n = 5$) Not uniform.

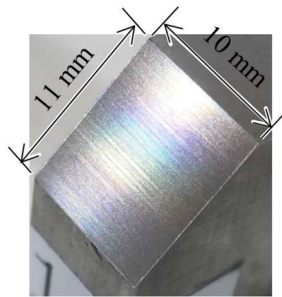


Fig. 2.21 Photograph of sample No. 15

Table 2.20 Comments for sample No. 15

Positive 光沢がよい.

($N_p = 24$) Nicely glossy.

均一.

Uniform.

虹色に一番みえない.

The least iridescence.

Negative (No negative judgement)

($N_n = 0$)

表 2.5 では全体的な傾向として、ピックフィードと送り速度が小さいサンプルで N_p が N_n を上回り、反対に大きいサンプルでは N_n が N_p を上回る傾向がみられる。すなわち、理想的なカスプ形状のスケールが小さいサンプルで肯定的な判定が比較的多く、カスプ形状のスケールが大きいサンプルでは少なくなっている。しかしながら、例えば 5, 13, 14 番のサンプルではピックフィードまたは送り速度が比較的大きいが、 N_p が N_n を上回っている。したがって、加工条件と良否の間に必ずしも明らかな相関関係は無いと言える。

加工面サンプルの表面粗さと肯定的な判定の数の相関関係を調べた。肯定度合いをあらわすパラメータ p を、 N_p と N_n を用いて次式により求めた。

$$p = \frac{N_p}{N_p + N_n} \quad (2.1)$$

p は判定の総数に占める肯定的な判定の数の比をあらわす。

図 2.22 に各サンプルの p と表面粗さ Sa の関係を示す。図中の番号はサンプルの番号をあらわす。○印は、それぞれのサンプルの異なる 3 箇所を測定して得た表面粗さの平均を、エラーバーの長さは標準偏差をあらわす。例えば 4, 12 番は Sa が比較的大きく p が小さい。反対に 10, 11, 15 番は Sa が比較的小さく p が大きい。しかしながら、1, 2, 3, 6, 7, 8, 9 番では比較的 Sa が小さいが p は小さく、反対に 5, 13 番では比較的 Sa が大きいが p は高い。以上から、表面粗さと肯定度合い、すなわち良否の間には必ずしも明らかな相関関係が無いことがわかる。

なお、14 番では $p = 0.58$ であり、他のサンプルに比べ肯定度合いが明確でない。表 2.19 に示した通り、14 番の肯定的な判定の理由に関するコメントは得られず、否定的な判定の理由として得られたコメントでは不均一さに言及している。肯定度合いが明確でなかった理由として、照明光や観察の角度によって不均一さが明確に見られる場合と不明確な場合があった、または均一か不均一かを判定する基準が評価者によって異なっていたなどの可能性が推測される。

また良否判定の総数 $N_p + N_n$ に注目すると、1, 2, 3 番などのサンプルでは 10 以下であるが、4, 15 番などでは 20 を超えている。図 2.23 に、各サンプルの判定の総数 $N_p + N_n$ と表面粗さの関係を示す。 $Sa \leq 0.4 \mu\text{m}$ の領域では、判定総数が 10 未満のサンプルと 10 以上のサンプルがそれぞれ 6 個あるのに対して、 $Sa \geq 0.4 \mu\text{m}$ の領域ではすべてのサンプルに 10 以上の判定がある。よって、表面粗さが小さいサンプルに注目した評価者が多いとは一概に言えないが、表面粗さの大きいサンプルに注目した評価者は比較的多いと言える。したがって、カスプ形状のスケールの比較的大きい加工面に評価者が注目する傾向がある。ただし、今回用意した 15 個のサンプルでは $Sa \geq 0.4 \mu\text{m}$ であるものが 3 個であり表面粗さ自体に偏りがあるため、表面粗さの大きいサンプルを増やして改めて検討する必要がある。

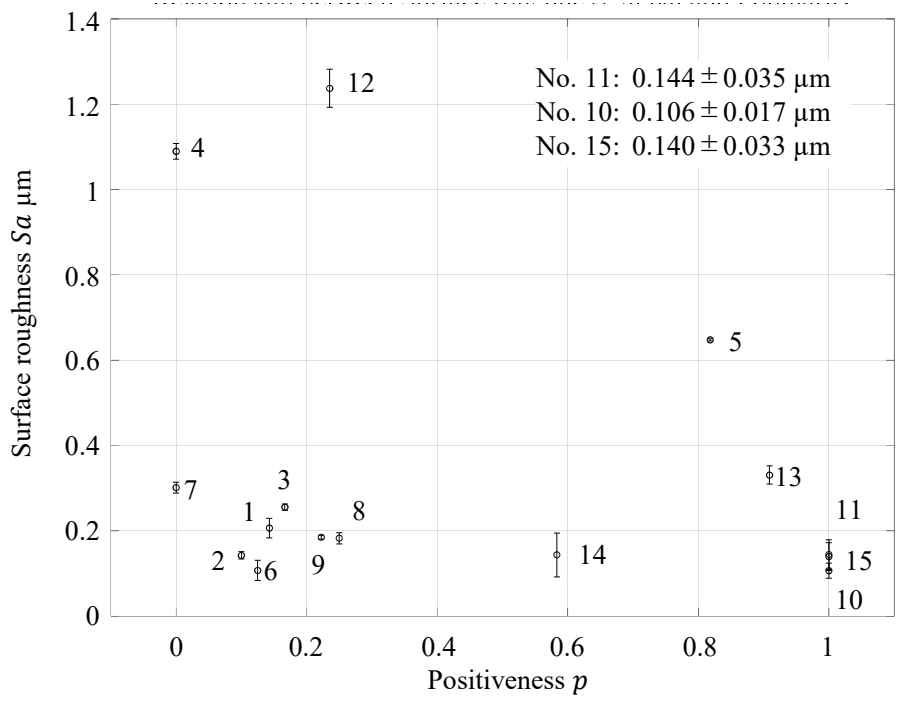


Fig. 2.22 Relationship between surface roughness and positive reaction in sensory evaluation questionnaire

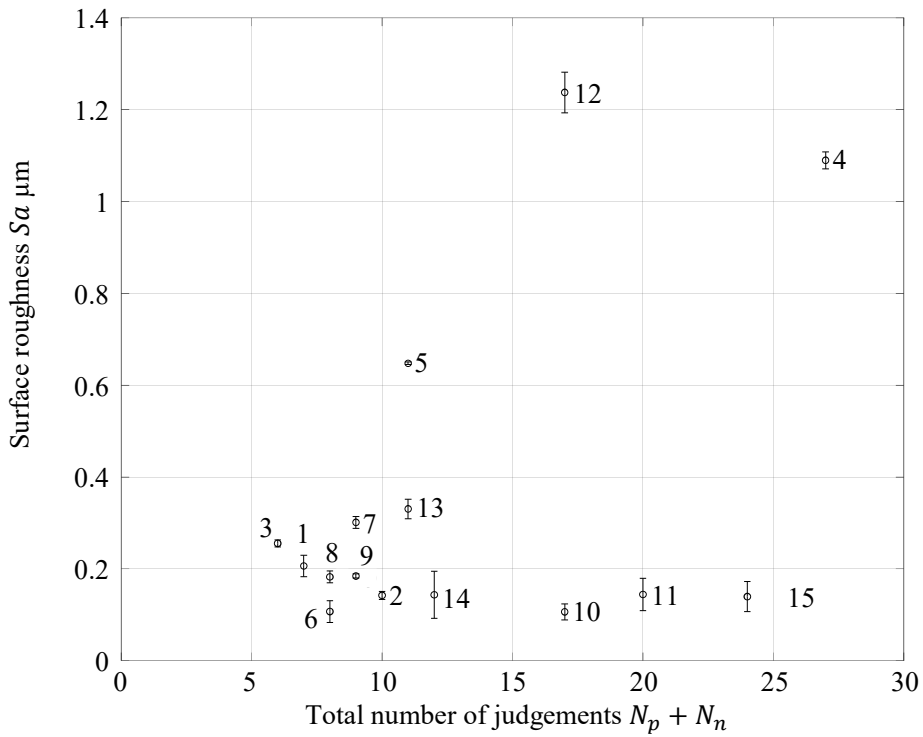


Fig. 2.23 Relationship between surface roughness and total number of judgements for each sample in sensory evaluation questionnaire

アンケート調査で得られたコメントから、代表的な官能指標を抽出する。表 2.6~2.20 には様々な評価があるが、以下の3つの共通の指標が見受けられる。本研究では、これらの官能指標に注目することとする。

(a) 光沢の度合い

8番の「最も光を反射して」や15番の「光沢がよい」といったコメントが見受けられる。特に15番についてはピックフィールド、1刃あたりの送りが小さく、カスプ形状のスケールが小さいため、表面が巨視的に平坦に近くなり鏡面に似た外観をもつためであると考えられる。

(b) 虹色，虹面

9番の「虹色」のコメントは否定的な判定の根拠，15番の「虹色に見えない」は肯定的な判定の根拠となっていることから，本アンケートでは虹色は否定的な判定の根拠となる官能指標であると考えられる。一般に，カスプ形状のスケールが小さくなったとき，微視的な形状による光の回折と干渉が原因となって，観察や照明光の方向によって様々な色が見えることが知られており，このような加工面は虹面とよばれる[10]。

(c) 均一さと不均一さ

多くのサンプルで「均一」というコメントは肯定的な判定の根拠，「均一でない」というコメントは否定的な意見の根拠となっている。特に表面粗さの比較的大きい4，5，12番には，図 2.23 に示した通り比較的多くの評価者が注目しており，4番は不均一で5，12番は均一であるという傾向がみられる。図 2.10，2.11，2.18 にそれぞれ示した写真では，カスプ形状に起因するとみられる模様（切削模様）がみられる。そこで，カスプ形状のスケールが大きく切削模様が視認できる場合の均一さと不均一さに注目する。

2.5 先行研究と課題

2.4節で示したように，加工面の良否と表面粗さに必ずしも明らかな相関関係は無く，良否の判定基準となった官能指標には様々なものがある。そこで，表面粗さ以外の外観に関するパラメータを用いて，加工面の良否を判定する手法は多く研究されてきた。

外観を定量的に評価する上で代表的なものは，画像を取得し処理する手法である。加工面の官能指標を画像処理により定量評価した先行研究は多くある。Pernkopf と O'Leary[23]はベアリング部品の表面の不良を原因別に分類した。光学に基づいた反射モデルを考慮し，加工面の写真に対して画像処理をおこなうことにより不良の原因を判定できるシステムを構築した。Matrinez ら[24]は研削加工面の不良を原因別に体系化し，加工面の写真を撮影し画像処理により原因を推定するシステムを提案した。Chen ら[25]は，セラミックスの研削面および研磨面の顕微鏡写真に対して画像処理をおこなうことで，不良の原因を推定する手法

を確立した。酒井ら[26]はフラクタル幾何学を応用して加工面の不規則性を解析する手法を考案し、シェーパー加工、フライス加工、平面研削、バフ研磨された金属面のレーザ顕微鏡画像の特徴の違いを定量的に評価した。Liら[27]は、加工面にレーザ光を照射して得られた散乱模様を利用して、工具が摩耗する前後での表面性状の変化を定量的に評価する手法を提案した。この手法を旋削仕上げ面に適用し、工具交換時期を自動的に判断するシステムを構築した。

こういった画像処理を用いる手法では、画像を取得する実験条件を統一することが重要となるため、照明と観察に用いる装置およびセットアップを統一する必要がある。しかしながら、官能評価においては評価者が様々な方向から加工面を観察することがあり、1通りの方向ですべての官能指標を説明できるかは必ずしも明らかでない。特に加工面の評価では、切削方向や送り方向に対する照明光と観察の方向が重要であることも予想される。さらに、画像データは人間の視覚的な情報とは異なる場合がある。例えば顕微鏡画像は加工面を拡大したもので、顕微鏡で観察されるような微視的な形状は肉眼では視認できないことが多い。さらに、加工面形状と画像データの因果関係を説明することには至っていない。

人間の視覚的な情報に関係した指標を用いた研究例もある。米原らは、官能指標として光沢度と表面色に注目し、定量評価手法として分光測色計を用いて測定することを提案している。例えばアルミニウム合金のフライス加工面[28]、窒化チタンをコーティングしたステンレス鋼の研磨面とショットブラスト加工面[29]、ABS樹脂のシボ加工面[30]の評価を試みている。さらに、切削加工面の創成機構に関連して、切削方向に対する測定の相対的な方向が評価指標に影響することを指摘している。しかしながら、加工面形状と官能指標の因果関係を説明することには至っていない。

佐藤ら[31]は、工作機械の運動誤差が加工面形状の外観に与える影響を、加工モデルとCG (Computer Graphics, コンピュータ・グラフィックス) を組み合わせたシミュレーションにより予測し実験により検証しているが、カスプ形状の巨視的な変化のみを考慮している。

2.6 官能指標の解析の方針

従来の定量指標と良否との相関関係や先行研究をまとめた結果、以下のような課題があると考えられる。

- (a) 表面粗さと官能指標や良否の間には必ずしも明らかな相関関係はみられないため、表面粗さを用いて官能指標を説明することは困難である。切削加工面にはカスプ形状と微視的な形状があり、単純に高さの分布を平均化して評価することが適していないためであると考えられる。したがって、切削加工面の創成機構を踏まえ、カスプ形状と微視的な形状を統合する必要がある。

- (b) 画像データは人間の視覚情報に近いと考えられるが、照明光と観察の方向などの観察環境が評価結果に大きく影響することが想定される。したがって、測定装置・観察環境・評価者の差異の影響を除くことが可能な評価手法が必要である。また、撮影装置の解像度や感度は必ずしも肉眼と同じではなく、画像データは人間が肉眼で観察した場合の視覚情報と必ずしも同じではない。
- (c) 視覚情報に関連した指標を測定した、あるいは視覚情報をシミュレーションにより予測した研究はあるが、加工面の巨視的・微視的な形状の両方を統合して官能指標を説明する必要がある。

(a)より、単に加工面形状データを処理するのではなく、人間の視覚情報に関連づけて評価すべきであると考えられる。(b)については、外観を測定する装置や評価者が無くとも評価できることが望まれる。そこで、加工面の形状データを用いて視覚シミュレーションをおこなうことにより評価することが考えられる。シミュレーションでは照明光や観察の方向を一意に定めることが可能であり、観察セットアップの差異を除くことができる。また、形状データと画像データの関係を考察することも容易になると予想される。さらに(c)については、視覚シミュレーションにおいて加工面の微視的な形状を考慮した計算をおこなうことにより解決できると考えられる。

そこで本研究では、巨視的・微視的な形状をもつ切削加工面が照明光を反射し人間の肉眼に届く物理的な過程と、肉眼に届いた光が視覚情報に変換される心理物理的な過程をモデル化することで、視覚シミュレーションを構築する。視覚シミュレーションで得られた視覚情報を処理することで、官能指標を説明する。第3章で視覚シミュレーション手法の構築について述べる。視覚情報から官能指標を計算する手法については、第4章で光沢の度合い、第5章で虹面の色、第6章で切削模様の均一さと不均一さに注目して述べ、それぞれ実験により検証する。

2.7 結論

切削加工面の基本的な創成機構と、現状の定量評価方法および定量指標をまとめた。表面粗さと良否の相関関係を官能評価アンケート調査により調べ、官能指標を解析する方針について考察した。得られた結論は以下の通りである。

- 1) 切削加工面の良否を判定する際に用いられる代表的な定量指標は表面粗さであるが、加工面の異方性を表現できない点や巨視的、微視的な形状を統合して評価できない点が問題である。

- 2) 切削加工面を用いた官能評価アンケート調査をおこなった結果、加工面の表面粗さと良否の間に明らかな相関関係はみられなかった。
- 3) 官能評価アンケート調査の結果に基づき、代表的な官能指標が、光沢の度合い、虹面の色、切削模様の均一さであることがわかった。
- 4) 本研究で官能指標を解析する方針として、巨視的・微視的な形状をもつ切削加工面で反射した光が人間の肉眼に届く物理的な過程と、肉眼に届いた光が視覚情報に変換される心理物理的な過程をモデル化することで、視覚シミュレーションを構築する。視覚シミュレーションで得られた視覚情報を処理することで、官能指標を定量的に説明する。

第3章 視覚シミュレーションの構築

3.1 緒論

本章では、加工面の官能評価における物理的・心理物理的な過程をモデル化し、視覚シミュレーション手法を構築する。

物理的な過程をモデル化するには、加工面からの出力として計算すべき量を決定する必要があるため、心理物理的な過程の入力を整理する必要がある。そこでまず、心理物理的な過程として人間の視覚系の構造と視覚情報の処理の流れについてまとめる。この中で視覚情報が輝度と色に分かれることを述べ、両者を定量化するための測光学、色彩工学についての基本事項を整理する。

物理的な過程をモデル化するにあたっては、既存の視覚シミュレーション手法である CG (Computer Graphics, コンピュータ・グラフィックス) [32]が参考となる。CG の工程を概説し、特に重要となる光の反射を計算するモデルの課題を指摘する。

以上の知識を基に、加工面データから視覚情報を計算する視覚シミュレーション手法を構築する。特に反射光の強度を計算する Beckmann の散乱理論[33]について詳細に述べる。

本章の構成は以下の通りである。3.2 節では、眼球から脳までの視覚に関わる神経経路の構造と視覚情報の処理の流れ、および視覚情報の定量化について述べる。3.3 節では、視覚シミュレーションの構築の参考として CG の工程をまとめる。3.4 節では、CG の工程にならって視覚シミュレーション手法を構築する。3.5 節は以上の内容をまとめた結論である。

3.2 視覚系の構造と視覚情報の処理および定量化

3.2.1 神経経路の構造と視覚情報の処理

図 3.1 に眼球から脳までの神経経路の構造を示す。鵜飼ら[34]によれば、両眼から出発した視神経は視交叉で交差し、外側膝状体を通して大脳皮質に至る。眼球に入った光は、網膜内の視細胞によって電気信号に変換され、網膜内部の他の細胞、視神経、外側膝状体を通じて伝達される。大脳皮質を過ぎて V1 と V2 を通った後は、背側経路、腹側経路の 2 つに分かれる。「背側経路には、動きや奥行きに感受性をもつ細胞が存在し、運動中に時々刻々と変化する外界に対応できるように、高速な情報処理が可能な仕組みが採用されている。腹側経路には、物の形、微小な 3 次元構造、色、テクスチャーといった視覚特徴やパターンに感受性を持つ細胞が存在し、顔に特異的に応答する細胞も報告されている」(鵜飼ら, 2007[34], p. 46, 1~5 行目)。

「視覚に関わる神経細胞は、視野内に担当領域を持っており、受容野と呼ばれている」(鵜飼ら, 2007[34], p. 27, 29~30 行目)。図 3.2 に示すように、神経経路の中で上の階層にある細胞は下の階層の複数の細胞の信号を受ける。最も下の階層にある視細胞の受容野は小さいが、上の階層の細胞は複数の視細胞からの信号を受け取るため、受容野は大きくなる[34]。

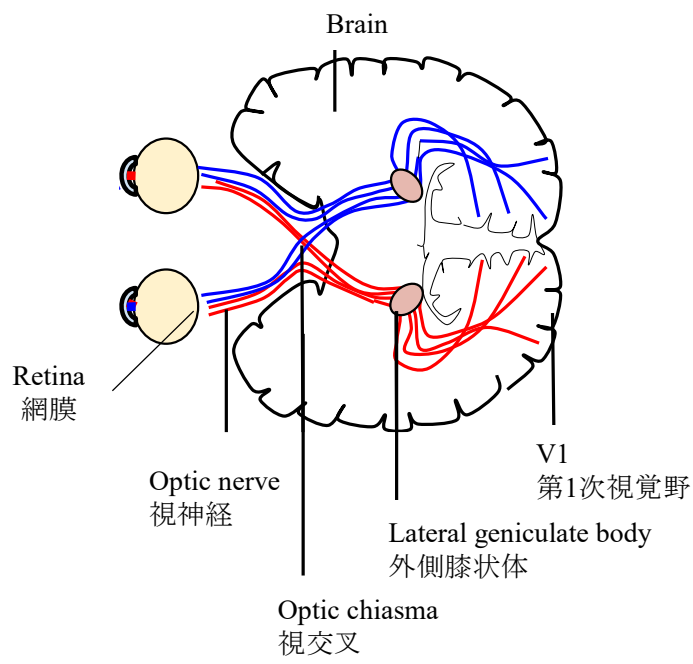


Fig. 3.1 Structure of neural pathway from retina to brain
 (Mads00, 2016[35], File:Neural pathway iagram.svg の注釈を改変して作成)

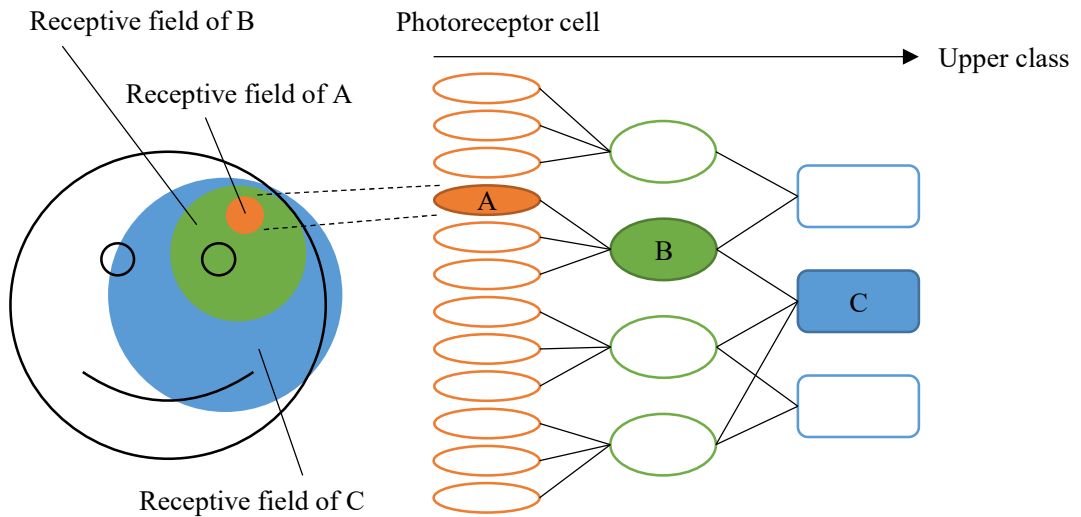


Fig. 3.2 Hierarchy of cells related to vision and their receptive fields
 (鶴飼ら, 2007[34], p. 28, 図 2.2 を参考として作成)

図 3.3 に眼球の構造を示す。光は水晶体や硝子体を通して網膜に達し、網膜の中の視細胞が光を感知し電気信号に変換する。電気信号は視神経を通して脳へと伝達される。網膜上で視野の中心に相当する部分は中心窩とよばれる。

網膜には、光を最初に感知する細胞である視細胞がある。「視細胞には錐体と桿体が存在し、それぞれ明るい場所、暗い場所での視覚を担当している」(鵜飼ら, 2007[34], p. 29, 12~13 行目)。視細胞は網膜上で均一に分布しているわけではなく、錐体は中心窩では密に分布しているが、視野の外側に向かうにつれて急速に密度が小さくなる[34]。Williams[37]の測定によれば、錐体の配列は中心窩では六方最密充填のような構造になっており、間隔は視野角で約 0.5 分である。一方で桿体は中心窩では存在しないが、視野角が約 20° の領域で極大となり、視野の外側で密度が小さくなる[34]。

「錐体には光の波長に対する感度の異なる 3 種類があり、色覚に関係している。これらは L 錐体, M 錐体, S 錐体と呼ばれ、それぞれ長波長, 中波長, 短波長領域に感度のピークがある」(鵜飼ら, 2007[34], p. 30, 5~7 行目)。L, M, S 錐体の数の比率はおよそ 32:16:1 であることが知られている[38]。ただし、錐体の分布の様子には個人差があり、必ずしもランダムに分布しているわけではない[39]。例えば、S 錐体が均一に分散している個体もいれば、複数の S 錐体が隣り合って分布している個体もある。「桿体は 1 種類しかないので、暗いところでは色の識別ができない」(鵜飼ら, 2007[34], p. 30, 7~8 行目)。

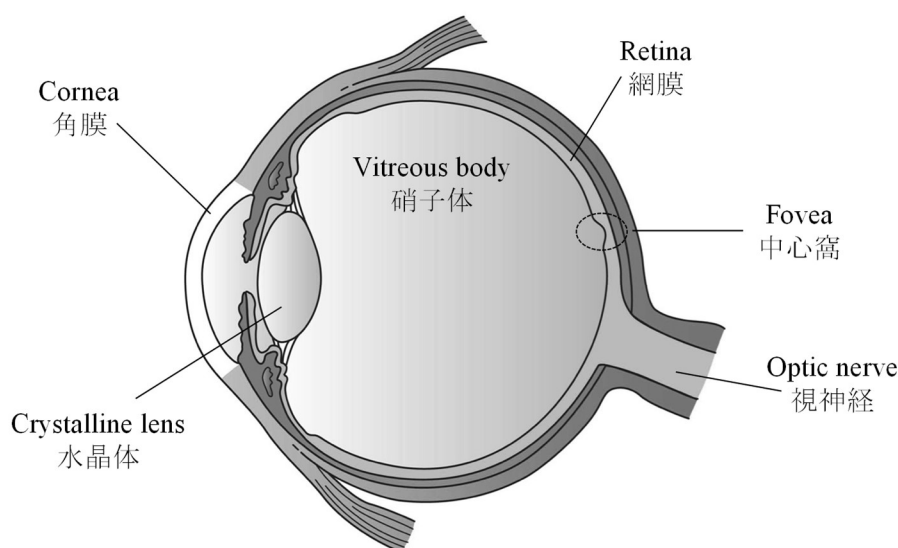


Fig. 3.3 Structure of eyeball

(Holly Fischer, 2013[36], File:Three Main Layers of the Eye.png に注釈を追加)

「網膜では視細胞が光を電気信号に変換しているが、この信号がそのまま大脳皮質に伝達されるわけではない。近傍の細胞間で演算が行われ、一段階画像処理が行われた結果が網膜神経節細胞 (retinal ganglion cell) から出力され、外側膝状体 (lateral geniculate nucleus : LGN) を経て大脳皮質に至る」(鵜飼ら, 2007[34], p. 31, 25~28 行目)。網膜において視細胞の上の階層にある網膜神経節細胞と、図 3.1 に示した外側膝状体細胞には、「大きく分けて2種類の細胞群が存在し、時空間特性の異なる2つの経路で情報伝達が行われている。1つは大細胞系 (magnocellular pathway) と呼ばれる時間解像度が高く空間解像度が低い経路、もう1つは小細胞系 (parvocellular pathway) と呼ばれる空間解像度が高く時間解像度が低い経路である。大脳皮質においては、大細胞系の信号は主に高い時間解像度が必要な動きの検出に、小細胞系の信号は主に高い空間解像度が必要な形や物体認識のために用いられている」(鵜飼ら, 2007[34], p. 31, 31 行目~p. 32, 6 行目)。

大細胞系の細胞は比較的大きな受容野をもち、輝度のオンオフに応答し色彩は感受しない[34]。図 3.4 に大細胞系の細胞の受容野の構造の概念図を示す。受容野の中心と周辺部分で分かれており、同図(a1)のように中心がオン領域で周辺部分がオフ領域のパターンと、(a2)のように逆のパターンがある[34]。「オン領域では明るさが増加する変化が起こったとき、たとえば電球が点灯した場合に正の応答、明るさが減少する変化が起こったとき、つまり電球が消えたときに負の応答をする。オフ領域はその逆である」(鵜飼ら, 2007[34], p. 32, 11~14 行目)。例えば同図(b1)のように受容野全体が明るくなった場合は、一方の領域は正の応答を、他方は負の応答をするため、全体の応答は相殺される[34]。(b2)のように受容野の一部の領域で明るさが増加した場合に領域全体として応答するため、「面の内部の領域では応答しない一種のエッジ強調型画像フィルタと同じ挙動を示す」(鵜飼ら, 2007[34], p. 32, 16~17 行目)。

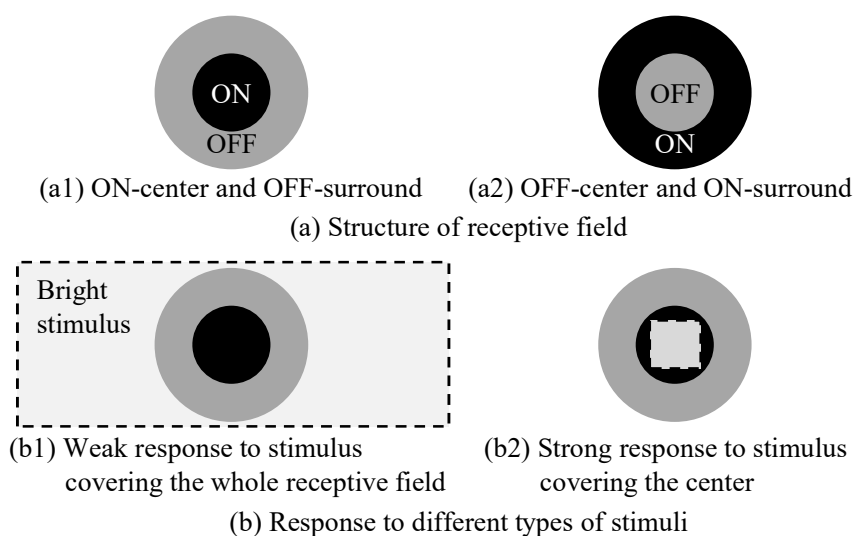


Fig. 3.4 Structure of receptive field of cells in magnocellular pathway

(鵜飼ら, 2007[34], p. 32, 図 2.4 を参考として作成)

「小細胞系の細胞の受容野は比較的小さく、大細胞系と同様、中心部と周辺部でオン、オフが拮抗した同心円状の空間構造を持つ」（鵜飼ら，2007[34]，p. 33，10~11 行目）。「視野（網膜）中心付近で最も空間解像度が高く、受容野中心領域が単一の L または M 錐体入力に対応しているため、色彩に感受性を持つ」（鵜飼ら，2007[34]，p. 33，12~14 行目）。「網膜神経節細胞には、もう 1 種類さらに小型の顆粒細胞系（konicellular pathway）が存在」（鵜飼ら，2007[34]，p. 34，6~7 行目）する。顆粒細胞系は色の情報処理に関与していると考えられている[34]。

「V1 は視覚情報が脳皮質に到達する最初の領域である。ここでは線の傾き、動き、奥行き、色といった視覚特徴が局所的に検出されている。V1 にはさまざまな種類の細胞が存在するが、代表的で理解が進んでいるのは単純型細胞、複雑型細胞および二重反対色細胞である。これらの細胞は局所的な線分の傾き、動き、視差からの奥行き、色彩といった基本的な視覚属性の検出を行っている」（鵜飼ら，2007[34]，p. 34，18~22 行目）。

単純型細胞の受容野は、図 3.5 に示すように、棒状のオン領域とオフ領域が隣り合ったような構造をしている[34]。このため、棒状の刺激が受容野の構造の方向に沿って与えられたときに強く応答する。「V1 には同じ空間位置に受容野を持ち、さまざまな方位、位相、空間周波数選択性を持つ細胞が存在する」（鵜飼ら，2007[34]，p. 35，30~31 行目）。複雑型細胞の受容野は、図 3.6 に示すように、単純型細胞のようにオン・オフが分かれているわけではないが、同様に棒状の刺激の空間周波数・方向によって応答が変化することがわかっている[34]。V1 の、特に単純型細胞による空間周波数・傾き検出を、画像処理におけるガボールフィルタとみなしてモデル化した研究が過去におこなわれている。

「刺激の光の強さの情報と刺激光の色の情報とは別々の神経経路で処理される。刺激光の光の強さを処理する経路が輝度チャンネルであり、光強度の情報が『輝度』として処理・伝達される。一方、刺激光の色の情報を処理する経路が（反対）色チャンネル（chromatic channel）であり、刺激光の色（波長）に関する情報が「色相」や「彩度」として処理・伝達される」（鵜飼ら，2007[34]，p. 102，28 行目~p. 103，3 行目）。

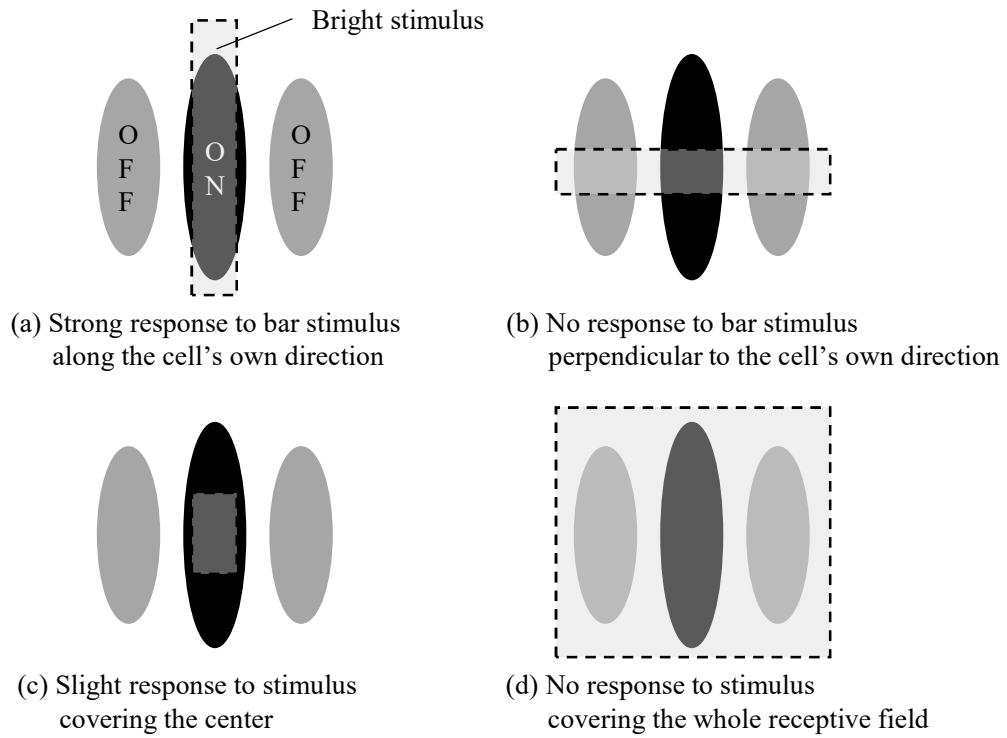


Fig. 3.5 Structure of receptive field of simple cell and its response to various stimuli

(鶴飼ら, 2007[34], p. 32, 図 2.4 を参考として作成)

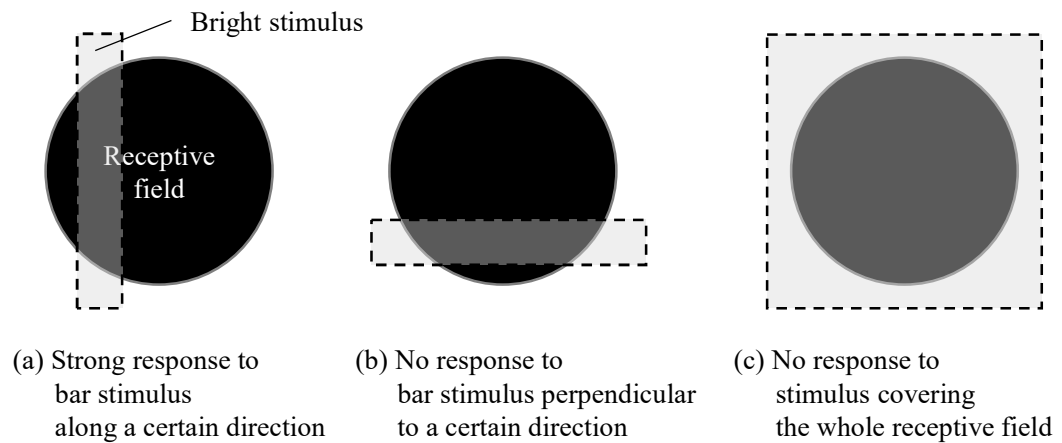


Fig. 3.6 Structure of receptive field of complex cell and its response to various stimuli

(鶴飼ら, 2007[34], p. 37, 図 2.7 を参考として作成)

3.2.2 輝度の定量化

まず測光学において光の明るさを定量化する際に用いられる量についてまとめる。測光学における放射量は物理量であり、単位時間や面積、立体角あたりのエネルギーを表すのに対し、測光量は人間の感覚で光のエネルギーを評価した量である[38]。表 3.1 に放射量と測光量を示す。表中の数式で、 t は時間、 ω は立体角、 S は面光源の面積、 θ は面の法線と光線のなす角をあらわす。この中で、輝度が人間の感じる明るさに対応する[38]。

人間の可視光の波長は、380~780 nm であるとされている[38]。この波長帯の中のすべての波長が等しい感度で処理されるわけではなく、波長によって感度は異なり、これを視感度とよぶ[38]。測光量は、放射量に視感度を乗じて得られる。

明所視における輝度 L は、分光放射輝度 $L_e(\lambda)$ と明所視分光比視感度 (Photopic spectral luminous efficiency) $V(\lambda)$ 、最大視感度 $K_m = 683 \text{ lm/W}$ を用いて次式により計算される[38]。

$$L = K_m \int_{380 \text{ nm}}^{780 \text{ nm}} L_e(\lambda) V(\lambda) d\lambda \quad (3.1)$$

$V(\lambda)$ の値は、国際照明委員会 (International Commission of Illumination, CIE) により定められている[40]。図 3.7 に明所視分光比視感度を示す。

輝度は光のエネルギーに比例するが、人間の感じる明るさは輝度に比例しない[34]。例えば輝度が2倍になったとしても、人間が「2倍明るい」と感じるわけではない。心理物理学において、一般にエネルギー量と感覚量の間には、次式にあらわされる Weber-Fechner の法則が成り立つことが知られている[34]。

$$(\text{感覚量}) \propto \log (\text{エネルギー量}) \quad (3.2)$$

視覚の分野においては、感覚量として知覚される明るさ、エネルギー量として輝度の間に式(3.2)が成り立ち、明るさ知覚 (Intensity coding) と呼ばれる[34]。比例定数は一定ではなく、肉眼が順応している明るさに依存する[41]。

Table 3.1 Radiometric quantity and photometric quantity [38]

(t is time, ω is solid angle, S is area of surface light source or illuminated surface,

θ is angle formed by light ray and normal line of surface light source or illuminated surface.)

Radiometric quantity 放射量			Photometric quantity 測光量		
Radiant energy 放射エネルギー	Q_e	J	Quantity of light 光量	Q	lm·s
Radiant flux 放射束	$\Phi_e = \frac{dQ_e}{dt}$	W	Luminous flux 光束	$\Phi = \frac{dQ}{dt}$	lm
Radiant intensity 放射強度	$I_e = \frac{d\Phi_e}{d\omega}$	W/sr	Luminous intensity 光度	$I = \frac{d\Phi}{d\omega}$	lm/sr cd
Irradiance 放射照度	$E_e = \frac{d\Phi_e}{dS}$	W/m ²	Illuminance 照度	$E = \frac{d\Phi}{dS}$	lm/m ² lx
Radiant exitance 放射発散度	$M_e = \frac{d\Phi_e}{dS}$	W/m ²	Luminous exitance 光束発散度	$M = \frac{d\Phi}{dS}$	lm/m ²
Radiance 放射輝度	$L_e = \frac{d^2\Phi_e}{dS \cdot \cos\theta \cdot d\omega}$	W/(sr·m ²)	Luminance 輝度	$L = \frac{d^2\Phi}{dS \cdot \cos\theta \cdot d\omega}$	lm/(sr·m ²) cd/m ²

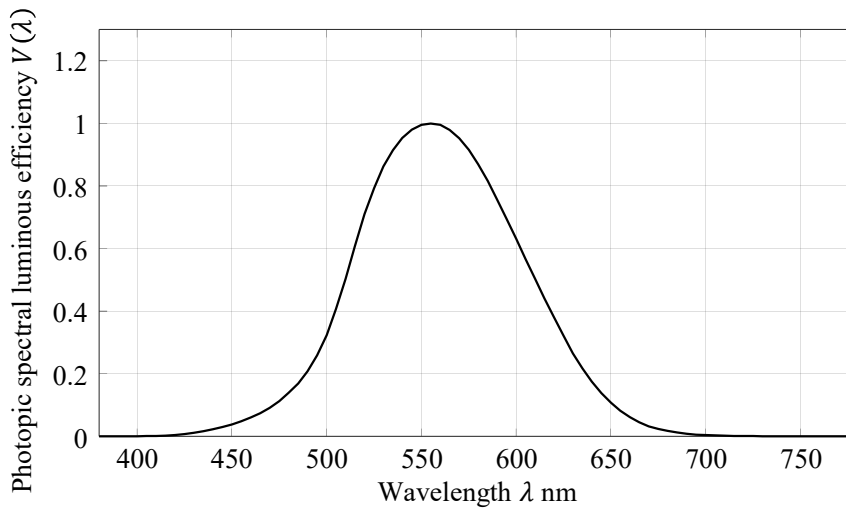


Fig. 3.7 Photopic spectral luminous efficiency $V(\lambda)$ [40]

3.2.3 色の定量化

色を定量化するための体系は表色系とよばれ、最も代表的なものが CIE XYZ 表色系[42]である。CIE XYZ 表色系では三刺激値 X , Y , Z を用いて色を表現する。 X , Y , Z は次式により計算される。

$$\begin{aligned} X &= k_Y \int_{380 \text{ nm}}^{780 \text{ nm}} L_e(\lambda) \bar{x}(\lambda) d\lambda \\ Y &= k_Y \int_{380 \text{ nm}}^{780 \text{ nm}} L_e(\lambda) \bar{y}(\lambda) d\lambda \\ Z &= k_Y \int_{380 \text{ nm}}^{780 \text{ nm}} L_e(\lambda) \bar{z}(\lambda) d\lambda \end{aligned} \quad (3.3)$$

ここで $\bar{x}(\lambda)$, $\bar{y}(\lambda)$, $\bar{z}(\lambda)$ は等色関数とよばれ、図 3.8 に示す波長の関数である。この中で $\bar{y}(\lambda)$ は明所視分光比視感度 $V(\lambda)$ と同じであるため、 Y は輝度 L に比例する。 k_Y は Y を規格化するための定数であり、表面が完全拡散反射面であると仮定したときの分光放射輝度 $L_{e,n}(\lambda)$ を用いて次式により計算される。

$$k_Y = 100 / \int_{380 \text{ nm}}^{780 \text{ nm}} L_{e,n}(\lambda) \bar{y}(\lambda) d\lambda \quad (3.4)$$

完全拡散反射面では、任意の観察角度での分光放射輝度 $L_{e,n}(\lambda)$ が分光放射照度 $E_{in}(\lambda)$ を用いて次式により計算される[38]。

$$L_{e,n}(\lambda) = \frac{E_{in}(\lambda)}{\pi} \quad (3.5)$$

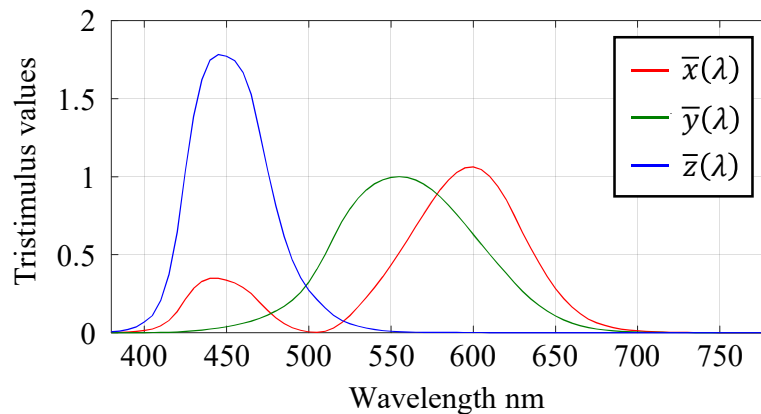


Fig. 3.8 Color matching function $\bar{x}(\lambda)$, $\bar{y}(\lambda)$, $\bar{z}(\lambda)$ in CIE XYZ color system [42]

三刺激値 X , Y , Z は、式(3.3)に示したようにエネルギー量である分光放射輝度に比例するため、輝度と同様に人間の感覚量に必ずしも比例しない。このため、知覚される色の変化と X , Y , Z の変化は必ずしも比例しない[43]。知覚される色の変化と表色値の変化が比例するような均等な表色系は均等色空間とよばれる[38]。均等色空間の代表として CIE $L^*a^*b^*$ 表

色系[42]がある。L*a*b*表色系では、次式により計算される3個のパラメータ L^* , a^* , b^* を用いて色を定量化する。

$$\begin{aligned}
 L^* &= 116 \left(\frac{Y}{Y_n} \right)^{1/3} - 16 \\
 a^* &= 500 \left\{ \left(\frac{X}{X_n} \right)^{1/3} - \left(\frac{Y}{Y_n} \right)^{1/3} \right\} \\
 b^* &= 200 \left\{ \left(\frac{Y}{Y_n} \right)^{1/3} - \left(\frac{Z}{Z_n} \right)^{1/3} \right\}
 \end{aligned}
 \tag{3.6}$$

ここで X_n , Y_n , Z_n は、表面が完全拡散反射面であると仮定した場合の XYZ 三刺激値である。図 3.9 に L*a*b*表色系の模式図を示す。 L^* の値の範囲は 0 から 100 であり、 L^* が小さくなるにつれて色は暗く、大きくなるにつれて色は明るくなる。 a^* と b^* は色度とよばれ、赤や青、緑などの色合いをあらわす。

色には、明度、彩度 (chroma)、色相 (hue) の3要素があることが知られている[38]。明度は色の明るさ、彩度は鮮やかさ、色相は、赤や青、緑などの色合いをあらわす。 L^* は明度に対応する。彩度をあらわすパラメータ C^* は次式により a^* , b^* から計算される[38]。

$$C^* = \sqrt{a^{*2} + b^{*2}}
 \tag{3.7}$$

色相をあらわすパラメータ h は次式により a^*b^* 平面上での位相角として計算される[38]。

$$h = \tan^{-1} \left(\frac{b^*}{a^*} \right)
 \tag{3.8}$$

以上に述べたように、分光放射輝度が得られれば、輝度は式(3.1)を用いて、色は式(3.3), (3.4), (3.6)~(3.8)を計算することで得られる。

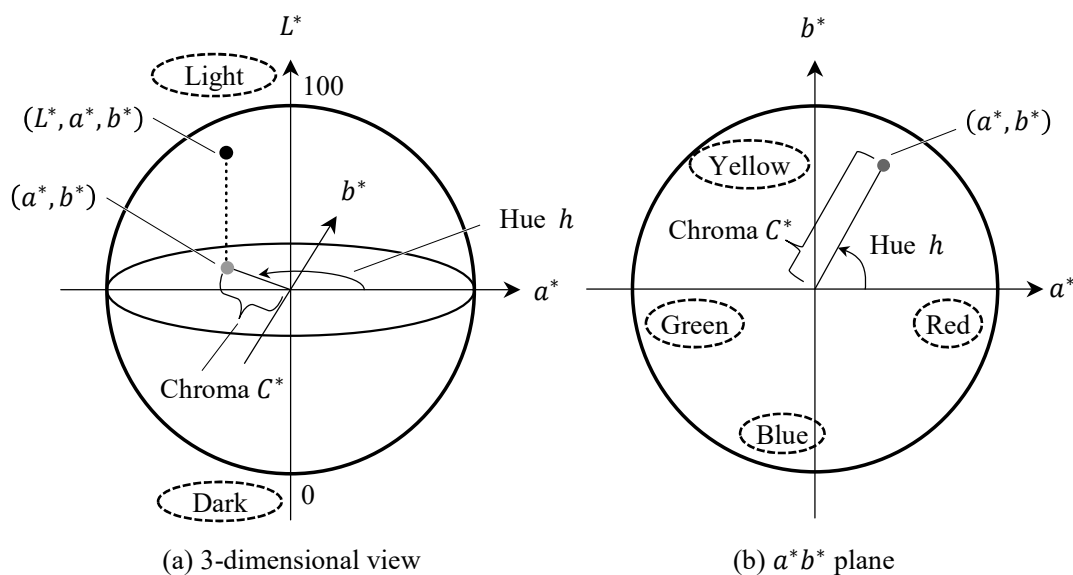


Fig. 3.9 Schematic of CIE L*a*b* color space

(城 編, 2018[44], p. 99, 図「L*a*b*表色系の色空間」を参考として作成)

3.3 CGの工程

3.3.1 デジタルカメラモデル

コンピュータ・グラフィックス (Computer Graphics, 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[32]。デジタルカメラモデルは主に以下の5つの段階に分けられる。

- (a) モデリング：観察対象を用意する。
- (b) 投影：視点の位置と方向を決め、観察対象の像の形を定める。
- (c) シェーディング：照明光と観察対象から反射光の強度を計算する。
- (d) AD変換：連続的な値をもつ反射光の強度をデジタル値に変換して記録する。
- (e) 画像処理：必要に応じて画像データを処理する。

このうちの(a)から(d)までの工程について述べる。

3.3.2 モデリング

観察対象を3次元のモデルとして表現する。モデル作成の手法には、図3.10に示すような3種類がある[32]。ワイヤフレームモデルでは、稜線のみで立体を表現し、稜線の間面の情報や、物体の内外の情報は無い。サーフェスモデルは、ワイヤフレームモデルに面の情報を加えたものである。ソリッドモデルは、サーフェスモデルにさらに物体の内外の情報を加えたものである。

2.3節で挙げた形状測定器では、各測定点に対して高さが得られる。したがって、加工面をモデル化するにはサーフェスモデルを使うのが簡単であると考えられる。視覚シミュレーション手法でのモデリングの詳細は3.4.2節で述べる。

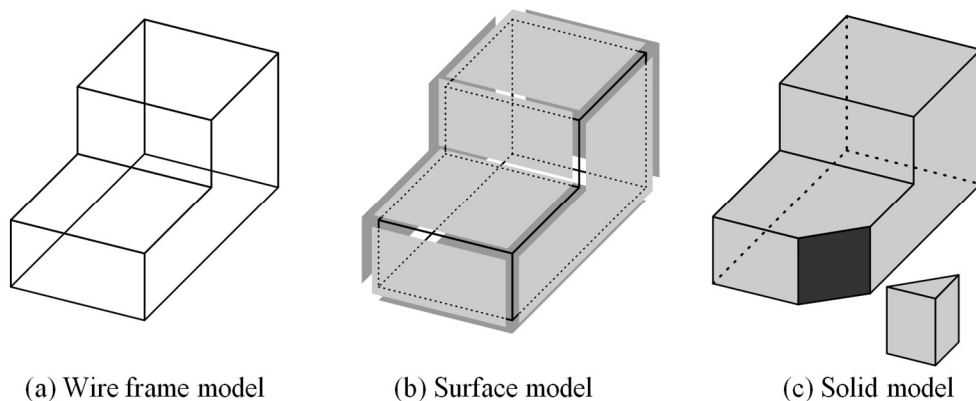


Fig. 3.10 Three different types of models in CG
(公益財団法人 画像情報教育振興協会, 2015[32],
p. 60, 図 3.1, p 61, 図 3.3, 3.4 を参考として作成)

3.3.3 投影

投影は、視野をあらわす面である投影面に3次元モデルを映し出す工程である[32]。図3.11に示すように、透視投影と平行投影の2種類の手法がある。透視投影では、「3次元図形の各点から視点に向かって線（投影線）を引くと、投影面上に投影線との交点の集まりとして投影図が形づくられる」（公益財団法人 画像情報教育振興協会，2015[32]，p. 39，9~11行目）。透視投影ではモデルの各点からの投影線が1点へ集中するため、遠くの物体は小さく、近くの物体は大きく投影される[32]。このため遠近感を表現できるが、3次元モデルが歪んで表示される[32]。一方で、平行投影では「3次元図形の各点から投影線を平行に投影面に下ろし、その平面上に投影図を形づくらせる」（公益財団法人 画像情報教育振興協会，2015[32]，p. 40，10~11行目）。このため、遠近感は表現できないがモデルの歪みが比較的少ない[32]。「平行投影は、透視投影の視点を限りなく遠くに置いたものと考えられる」（公益財団法人 画像情報教育振興協会，2015[32]，p. 40，12~13行目）。

加工面を観察する場合に置き換えると、複雑な奥行き形状がある加工面の広い面積を近い観察距離で観察する場合は透視投影を、形状の奥行きが比較的小さく、加工面の狭い面積を遠くから観察する場合は平行投影が適当であると考えられる。本研究では、面積が小さく単純な形状をもつ加工面を扱うこととし、簡単のため平行投影を用いることとする。

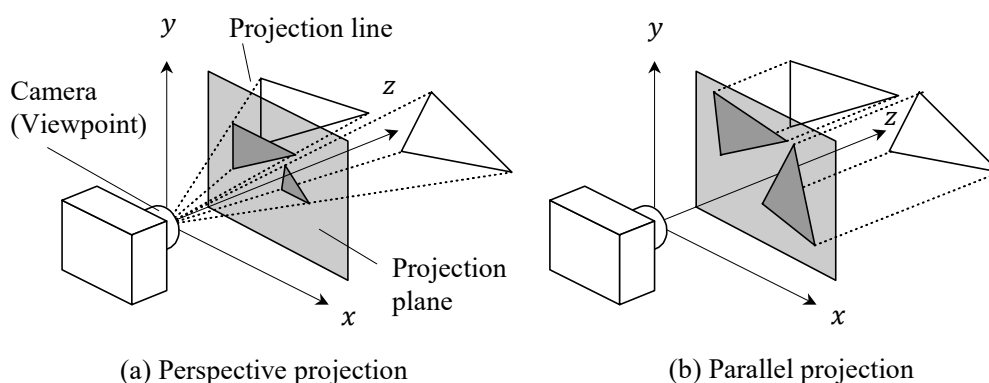


Fig. 3.11 Two different types of projection
(公益財団法人 画像情報教育振興協会，2015[32]，
p. 40，図 2.28，p. 41，図 2.31 を参考として作成)

3.3.4 シェーディング

シェーディングは、表面で反射した光の強度を計算する工程である[32]。CG では写実性を高くすると同時に計算コストを抑えることが望まれる。一般に物体表面での光の反射は極めて複雑な現象であるため、表面形状を高い空間分解能でモデル化し、光の反射を正確にモデル化すれば写実性は高くなると予想されるが、計算コストは高くなる。そこで、現実の光の反射を正確に表現でき、なおかつ可能な限り単純な関数を用いる反射モデルが提案されてきた。

入射光に対する反射光の強度の比は、入射角と反射角の関数としてモデル化される。この関数は双方向反射分布関数 (Bidirectional Reflection Distribution Function, BRDF) とよばれる [45]。図 3.12 に示すように、光の反射を鏡面反射成分と拡散反射成分に分けてモデル化し BRDF を求めることが多い [45]。鏡面反射成分は、正反射の方向にピークをもつような反射成分であり、拡散反射成分は、あらゆる反射角に均一に反射する成分である。

拡散反射成分を計算する代表的なモデルは Lambert モデル [45] であり、入射光が面の表層内部で乱反射することで生じる散乱光を表現する。鏡面反射成分については様々な物理モデルが考案されている。フォン Phong のモデル [46] は、正反射光の強度を経験的に求める古典的なモデルである。Cook-Torrance モデル [47] や Torrance-Sparrow モデル [48] は、物理的な解析に基づいた反射モデルであり、物体表面の法線方向の分布を考慮している。Ward のモデル [49] は、ヘアライン加工面などの異方性のある物体表面での反射を扱っている。

上述のモデルでは、表面の微視的な形状を平均化して表面粗さを表現するパラメータを計算し、そのパラメータを用いて反射光の強度を近似して計算している。しかしながら、このような平均化や近似計算が、多様なカスプ形状や微視的な形状をもつ切削加工面の視覚情報を計算する際に適切かは必ずしも明らかでない。

Beckmann [33] は、光学における Kirchhoff のスカラー回折理論 [50] を応用して、任意の形状に対して反射光の強度を計算する理論を確立している。Beckmann は表面形状を高さの確率的な分布として扱うことで、表面粗さと反射光の強度の関係式を導いており、Torrance-Sparrow モデルに利用されている。

従来の CG に用いられていない、任意の形状に対して電磁波の反射を計算する数値計算手法として時間領域差分法 (Finite Difference Time Domain Method, FDTD 法) [51] がある。FDTD 法では、電磁波が伝播する空間を数十 nm 程度の大きさのメッシュとして離散化し Maxwell 方程式を数値的に解く。nm スケールの周期構造をもつ面での光の反射を計算した研究例はある [52] が、計算コストが膨大で視覚シミュレーションに適用するのは現実的に困難である。

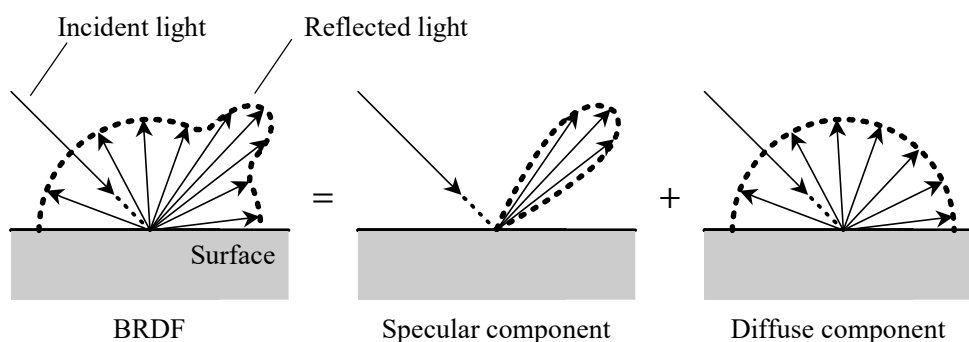


Fig. 3.12 Specular and diffuse components of BRDF

(向川, 2010 [45], p. 2, 図 2 を参考として作成)

本研究では、金属切削加工面を扱う。金属内部に入射した光は、数十 nm の侵入深さの中で急激に減衰する[53]ため、屈折により表面下に達して散乱し再び外部に進む光は無視できると考えられる。したがって、表面での反射のみを扱うこととする。ガラスやセラミックス、プラスチックなどの誘電体の切削加工面の評価については、表面での反射に加えて表面下での散乱および反射を考慮する必要があると考えられる。

3.3.5 AD 変換

シェーディングで得られる光の強度、CIE XYZ 表色系や CIE L*a*b*表色系で得られる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。デジタル画像に用いられる代表的な表色系に sRGB 表色系がある[54]。sRGB 表色系では 3 個のパラメータ R , G , B を用いて色を離散化し表現する。 R , G , B は以下の手順により、CIE XYZ 表色系の三刺激値 X , Y , Z から計算される。

まず X , Y , Z を次式により R' , G' , B' に変換する。

$$\begin{pmatrix} R' \\ G' \\ B' \end{pmatrix} = M_{\text{sRGB}} \begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \end{pmatrix} \quad (3.9)$$

ここで M_{sRGB} は次式により定められている。

$$M_{\text{sRGB}} = \begin{bmatrix} 3.2406 & -1.5372 & -0.4986 \\ -0.9689 & 1.8758 & 0.0415 \\ 0.0557 & -0.2040 & 1.0570 \end{bmatrix} \quad (3.10)$$

次に R' , G' , B' から R'' , G'' , B'' を次式により求める。

$$R'' = \begin{cases} 12.92 \times R' & (R' \leq 0.0031308 \text{ の場合}) \\ 1.055 \times R'^{\frac{1}{2.4}} - 0.055 & (R' > 0.0031308 \text{ の場合}) \end{cases}$$

$$G'' = \begin{cases} 12.92 \times G' & (G' \leq 0.0031308 \text{ の場合}) \\ 1.055 \times G'^{\frac{1}{2.4}} - 0.055 & (G' > 0.0031308 \text{ の場合}) \end{cases} \quad (3.11)$$

$$B'' = \begin{cases} 12.92 \times B' & (B' \leq 0.0031308 \text{ の場合}) \\ 1.055 \times B'^{\frac{1}{2.4}} - 0.055 & (B' > 0.0031308 \text{ の場合}) \end{cases}$$

最後に R'' , G'' , B'' を次式により 8 ビットのデータに変換することで R , G , B を得る。

$$\begin{aligned} R &= \text{round}(255 \times R'') \\ G &= \text{round}(255 \times G'') \\ B &= \text{round}(255 \times B'') \end{aligned} \quad (3.12)$$

なお、式(3.9)~(3.12)を逆に計算することで R , G , B から X , Y , Z を求められる。まず R , G , B は 0~255 の整数であるため、次式により 0~1 の範囲に正規化する。

$$\begin{aligned}
R'' &= R/255 \\
G'' &= G/255 \\
B'' &= B/255
\end{aligned}
\tag{3.13}$$

次に R'' , G'' , B'' から R' , G' , B' を次式により求める.

$$\begin{aligned}
R' &= \begin{cases} R''/12.92 & (R'' \leq 0.04045 \text{ の場合}) \\ [(R'' + 0.055)/1.055]^{2.4} & (R'' > 0.04045 \text{ の場合}) \end{cases} \\
G' &= \begin{cases} G''/12.92 & (G'' \leq 0.04045 \text{ の場合}) \\ [(G'' + 0.055)/1.055]^{2.4} & (G'' > 0.04045 \text{ の場合}) \end{cases} \\
B' &= \begin{cases} B''/12.92 & (B'' \leq 0.04045 \text{ の場合}) \\ [(B'' + 0.055)/1.055]^{2.4} & (B'' > 0.04045 \text{ の場合}) \end{cases}
\end{aligned}
\tag{3.14}$$

最後に、式(3.11)で定められている M_{sRGB} の逆行列を用いて、次式により CIE XYZ 表色系の三刺激値 X , Y , Z を計算する.

$$\begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \end{pmatrix} = M_{\text{sRGB}}^{-1} \begin{pmatrix} R' \\ G' \\ B' \end{pmatrix}
\tag{3.15}$$

画像データでは各画素について R , G , B の値が得られるが、撮影時に sRGB 表色系を設定している場合は上述の式(3.13)~(3.15)により R , G , B から CIE XYZ 表色系の三刺激値 X , Y , Z へ変換することができる. さらに 3.2.3 節で述べたように、 Y は分光放射輝度に等色関数 $\bar{y}(\lambda)$ を乗じて計算され、輝度 L は分光放射輝度に明所視分光視感度 $V(\lambda)$ を乗じて計算される. $\bar{y}(\lambda)$ と $V(\lambda)$ は同じ関数であるため、 Y は L に比例する. したがって、画像データから輝度に比例する量を得られる.

3.4 視覚シミュレーション手法の構築

3.4.1 視覚シミュレーションの全体の流れ

3.2 節で述べた人間の視覚系に関する知識、および 3.3 節で述べた CG の工程に基づいて、加工面の形状データを用いて視覚情報を計算する、視覚シミュレーション手法を構築する. 図 3.13 に視覚シミュレーションの概略を示す. 本シミュレーションは、(a) 加工面のモデリング、(b) 投影、(c) シェーディング、(d) 輝度と色の計算 の 4 つの工程からなる. 従来の CG との違いは、投影の工程において、人間の視覚系の空間分解能を考慮して視覚情報の解像度を定める点と、シェーディングの工程で、Beckmann の散乱理論を応用して加工面の微視的な形状を平均化せずに反射光の強度および分光放射輝度を計算する点である.

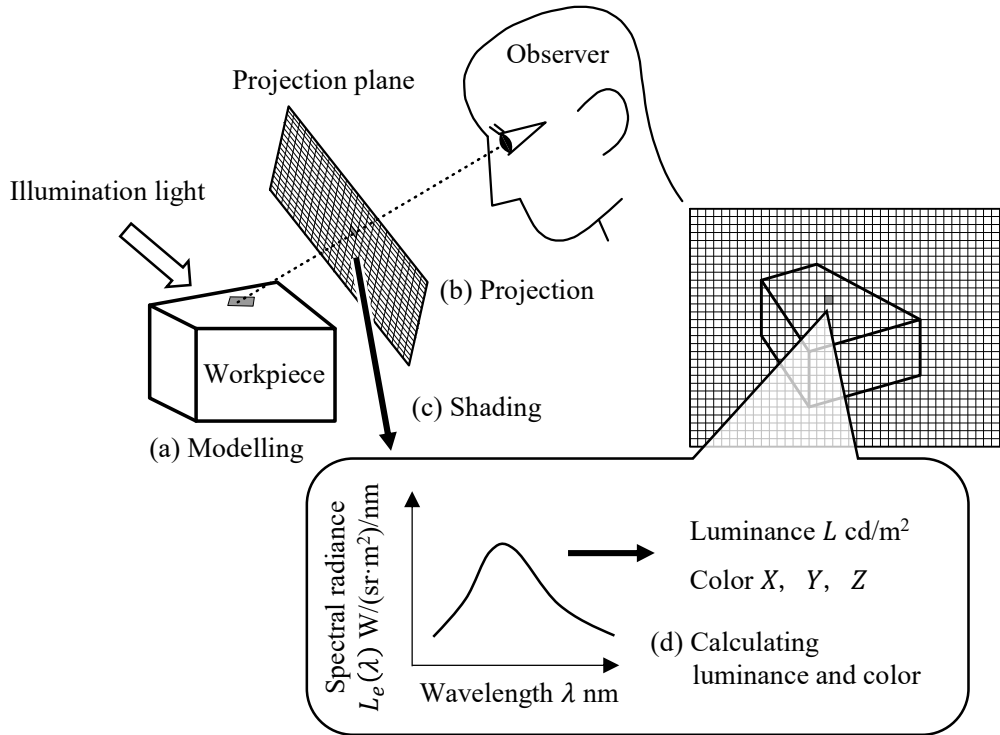


Fig. 3.13 Outline of the proposed visual simulation

3.4.2 モデリング

3.3.2 節で述べたモデリングの 3 つの手法のうち、図 3.10(b)に示したサーフェスモデルを用いる。

加工面形状は理想的には曲面であるが、図 3.14 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 $O-xyz$ とし、 \mathbf{e}_x , \mathbf{e}_y , \mathbf{e}_z をそれぞれ x , y , z 方向の基底ベクトルとする。また測定の空間分解能（測定位置の間隔）を $2L_{xy}$ とする。測定点の位置ベクトルを $\mathbf{x}_{i,j}$ とおくと

$$\mathbf{x}_{i,j} = x_i \mathbf{e}_x + y_j \mathbf{e}_y + z_{i,j} \mathbf{e}_z \quad (3.16)$$

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

$$z = A_{i,j}(x - x_i) + B_{i,j}(y - y_j) + z_{i,j} \quad (3.17)$$

$$(-L_{xy} + x_i \leq x \leq L_{xy} + x_i, -L_{xy} + y_j \leq y \leq L_{xy} + y_j)$$

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。

$$A_{i,j} = \frac{z_{i+1,j} - z_{i-1,j}}{2 \cdot 2L_{xy}}, \quad B_{i,j} = \frac{z_{i,j+1} - z_{i,j-1}}{2 \cdot 2L_{xy}} \quad (3.18)$$

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ため、可視光の波長帯での屈折率を用いる必要がある。明所視標準比視感度や CIE XYZ

表色系の等色関数が, 380 nm から 780 nm まで 5 nm の波長間隔で定められていることから, 本シミュレーションではこれらの波長でのデータを用いることとする.

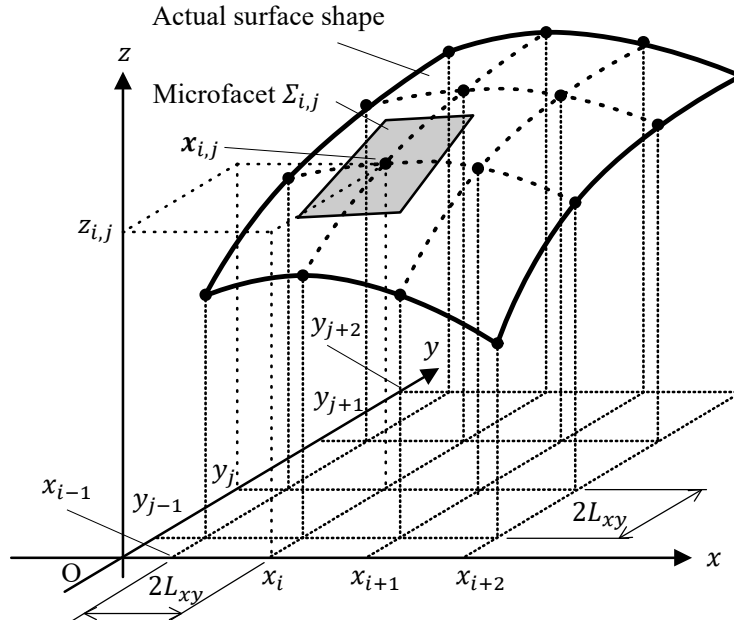


Fig. 3.14 Discretization of surface shape to microfacets

3.4.3 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. 投影面上に画素を配置し, 表面上の測定点を画素に対応づける.

まず視点 (観察者の目) の位置と観察の方向を定める. 視点を P とおき,

$$\mathbf{D} = \overrightarrow{OP} \quad (3.19)$$

とおく. 図 3.15 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 \mathbf{D} の方向をあらわす角度である. s 軸と t 軸は観察者から見てそれぞれ水平な方向, 垂直な方向とし, u 軸は \mathbf{D} の方向とする.

ワーク座標系 $O-xyz$ から観察者座標系 $P-stu$ へは以下のように座標変換をおこなう. まず, 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.

$$[\mathbf{e}_s \ \mathbf{e}_t \ \mathbf{e}_u] = [\mathbf{e}_x \ \mathbf{e}_y \ \mathbf{e}_z] \mathbf{M}_{wo} \quad (3.20)$$

ここで \mathbf{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.

$$\mathbf{M}_{wo} = \mathbf{Z} \left(\theta_3 + \frac{\pi}{2} \right) \mathbf{X}(\theta_2) \mathbf{Z}(\theta_r) \mathbf{Z}_{inv} \quad (3.21)$$

ただし \mathbf{X} , \mathbf{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.

$$\mathbf{X}(\theta) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \theta & -\sin \theta \\ 0 & \sin \theta & \cos \theta \end{bmatrix} \quad (3.22)$$

$$\mathbf{Z}(\theta) = \begin{bmatrix} \cos \theta & -\sin \theta & 0 \\ \sin \theta & \cos \theta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.23)$$

また, \mathbf{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.

$$\mathbf{Z}_{\text{inv}} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & -1 \end{bmatrix} \quad (3.24)$$

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. 加工面を水平な台に置き, 観察者が立って首を曲げずに観察している場合は $\theta_r = 0^\circ$ である. $P\text{-}stu$ 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ためである.

観察者座標系でみたときの $\mathbf{x}_{i,j}$ の座標を $({}^P x_{i,j}, {}^P y_{i,j}, {}^P z_{i,j})$ とおき, 次式により計算する.

$$\begin{pmatrix} {}^P x_{i,j} \\ {}^P y_{i,j} \\ {}^P z_{i,j} \end{pmatrix} = \mathbf{M}_{\text{wo}}^{-1} \begin{pmatrix} x_i \\ y_j \\ z_{i,j} \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ |\mathbf{D}| \end{pmatrix} \quad (3.25)$$

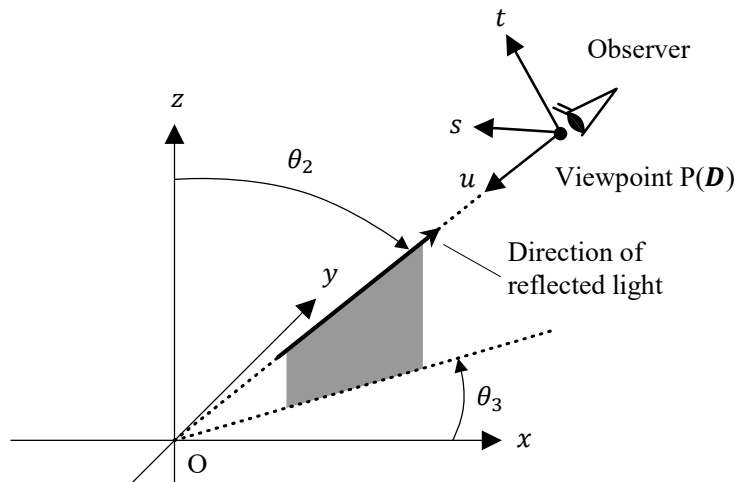


Fig. 3.15 Relationship between workpiece coordinate system O-xyz and observer coordinate system P-stu

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て投影面上に画素を配置する. また投影面に測定点を投影する.

投影面は, 観察者座標系における平面 $u = |\mathbf{D}|$ 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. Williams[37]が錐体分布について調査した結果をもとに, 図 3.16 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. したがって, 画素の間隔 d は次式により求められる.

$$d = \frac{\pi}{180} \frac{0.5}{60} |\mathbf{D}| \quad (3.26)$$

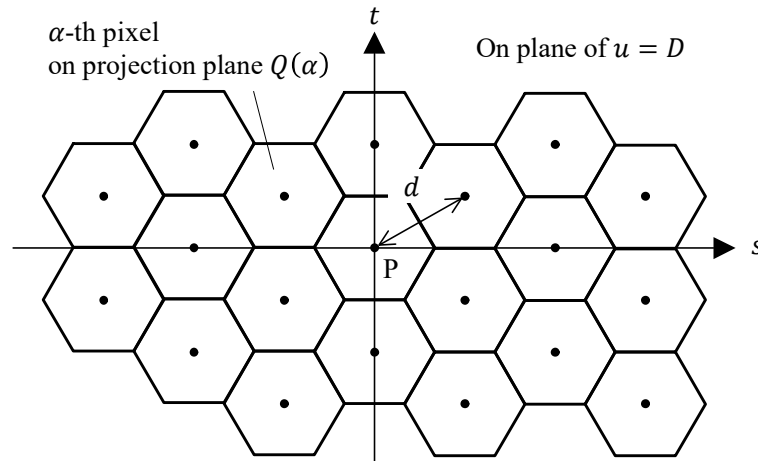


Fig. 3.16 Pixels on projection plane

次に表面上の測定点を投影面に投影する. 図 3.17 に示すように $\mathbf{x}_{i,j}$ を投影して投影面上に $\mathbf{q}_{i,j}$ を作る. このとき, 3.3.3 節で述べた通り平行投影を用いることとする. 加工面上の測定点 $\mathbf{x}_{i,j}$ を投影面上に投影したときの点 $\mathbf{q}_{i,j}$ を

$$\mathbf{q}_{i,j} = s_{i,j}\mathbf{e}_s + t_{i,j}\mathbf{e}_t + u_{i,j}\mathbf{e}_u \quad (3.27)$$

とおき, $s_{i,j}$, $t_{i,j}$, $u_{i,j}$ を次式により計算する.

$$s_{i,j} = {}^P x_{i,j}, \quad t_{i,j} = {}^P y_{i,j}, \quad u_{i,j} = |D| \quad (3.28)$$

最後に, 投影された測定点を画素に対応づける. 加工面のうち, 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, $\mathbf{q}_{i,j}$ 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.

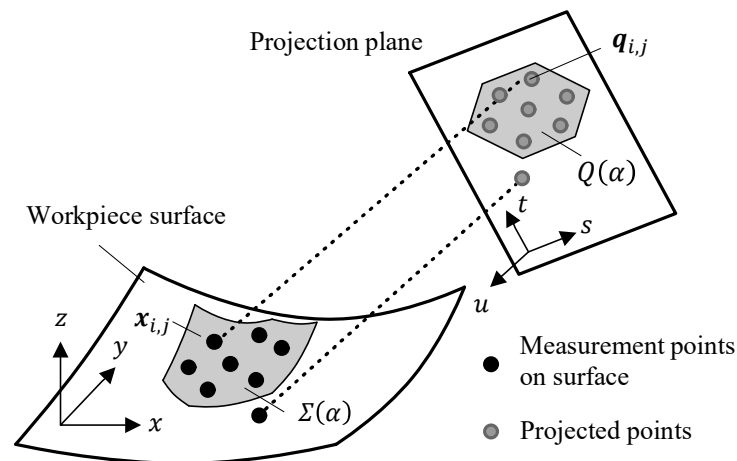


Fig. 3.17 Projecting measurement points on surface onto projection plane

3.4.4 シェーディング

3.4.3 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 $I_{\text{out}}(P, \alpha, \lambda)$ 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 $\Sigma_{\text{apparent}}(\alpha)$ とおくと, $L_e(\alpha, \lambda)$ と $I_{\text{out}}(P, \alpha, \lambda)$ の間には以下の関係がある[38].

$$L_e(\alpha, \lambda) = \frac{\{D(\alpha)\}^2}{\Sigma_{\text{apparent}}(\alpha)} I_{\text{out}}(P, \alpha, \lambda) \quad (3.29)$$

$I_{\text{out}}(P, \alpha, \lambda)$ の計算過程は 3.4.6 章で述べる.

3.4.5 輝度と色の計算

3.2.1 節で述べたように, 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[34]. 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と考えられる.

3.2.1 節で述べた通り, L, M, S 錐体の存在比率はおおよそ 32:16:1 である. 3 種類の錐体が理想的にランダムに分布していると仮定すれば, 49 個の錐体を 1 グループとみなせる. そこで, 1 つの画素での色は, その画素と周辺の合計 49 個の画素での平均的な色であると考えることとする. 図 3.16 に示した六方最密充填構造において, 1 つの六角形を中心として 49 個の六角形を含むような最小の円の半径は, 幾何学的に $\sqrt{13}d$ である. そこで本シミュレーションでは, 画素 $Q(\alpha)$ と, $Q(\alpha)$ の中心を中心とする半径 $\sqrt{13}d$ 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色を計算する.

輝度が L, M 錐体の応答の和であることは知られているが, 何個の L, M 錐体の応答を処理すればよいかは明らかでない. 本シミュレーションでは, 輝度については画素間での平均化をおこなわないこととする.

3.4.6 反射光の強度の計算過程

3.4.6.1 Beckmann の散乱理論

Beckmann の散乱理論[33]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する.

Beckmann の散乱理論によれば, 反射の法則と Kirchhoff の回折理論[50]を組み合わせることで観測点 (視点) 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 $I_{\text{out}}(P, \alpha, \lambda)$ を計算する手順を述べる. 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.

視点 P での電場の振幅 $E_2(P)$ は次式により得られる.

$$E_2(P) = \frac{1}{4\pi} \int_{\Sigma(\alpha)} [E(\nabla\phi) \cdot \mathbf{n} - \phi(\nabla E) \cdot \mathbf{n}] d\Sigma \quad (3.30)$$

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、式(3.30)から $dE_2(P, \mathbf{x})$ は次式によりあらわされる。

$$dE_2(P, \mathbf{x}) = \frac{1}{4\pi} [E(\nabla\phi) \cdot \mathbf{n} - \phi(\nabla E) \cdot \mathbf{n}] d\Sigma \quad (3.31)$$

$dE_2(P, \mathbf{x})$ を用いて、式 (3.30) は次式のように書き直せる。

$$E_2(P) = \int_{\Sigma(\alpha)} dE_2(P, \mathbf{x}) \quad (3.32)$$

表面上の任意の点で ϕ , $\nabla\phi$, E , ∇E を計算し式(3.31)により $dE_2(P, \mathbf{x})$ を求め、さらに式 (3.32) で積分することで $E_2(P)$ が得られる。

図 3.18 に、入射光 (照明光) 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

$$\phi = \frac{\exp[i\mathbf{k}_2 \cdot (\mathbf{D} - \mathbf{x})]}{|\mathbf{D} - \mathbf{x}|} \quad (3.33)$$

となる。 ϕ の空間微分 $\nabla\phi$ を計算すると次式が得られる。

$$\nabla\phi = \phi \left[-i\mathbf{k}_2 - \frac{\mathbf{D} - \mathbf{x}}{|\mathbf{D} - \mathbf{x}|^2} \right] \approx -i\mathbf{k}_2\phi \quad (3.34)$$

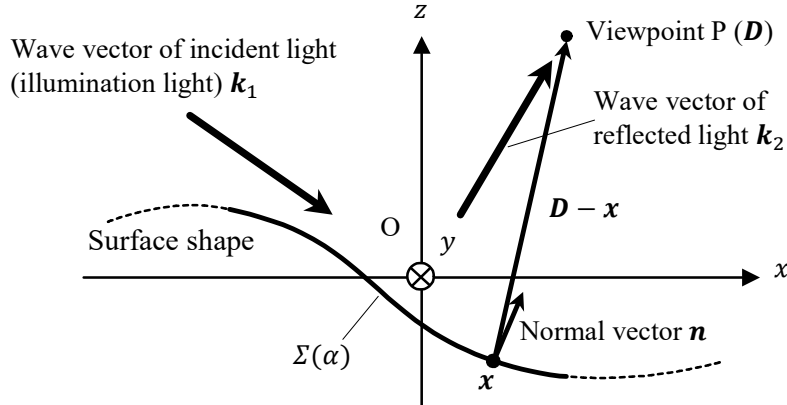


Fig. 3.18 Surface shape, wave vectors of incident light (illumination light) and reflected light, and viewpoint

3.4.6.2 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 3.19 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 3.19(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 3.20 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,

$$\begin{pmatrix} E_{1p} \\ E_{1s} \end{pmatrix} = \mathbf{M}_{1r} \begin{pmatrix} E_{1A} \\ E_{1B} \end{pmatrix} \exp[i\mathbf{k}_1 \cdot \mathbf{x}] \quad (3.35)$$

となる。ただし、 \mathbf{M}_{1r} は次式により計算される行列である。

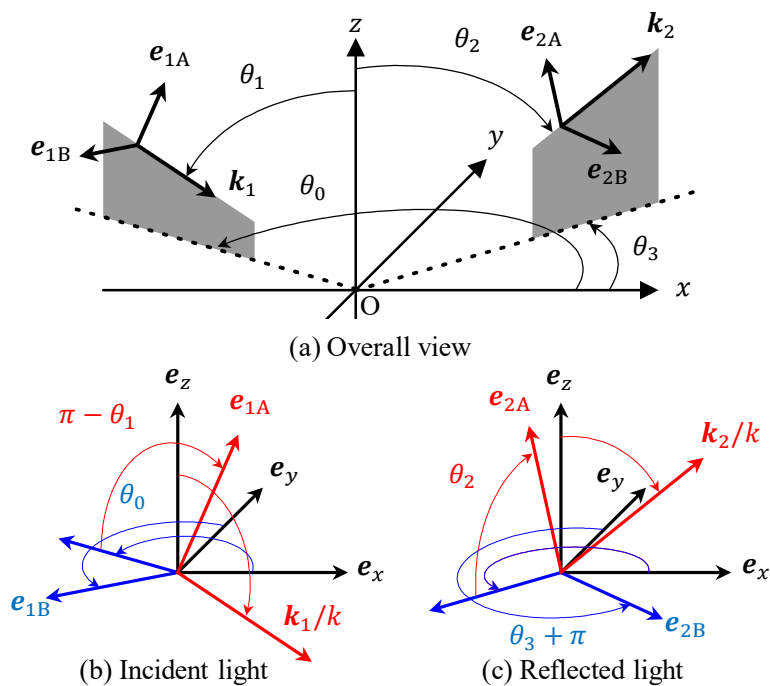


Fig. 3.19 Wave vector and polarization direction of incident and reflected light

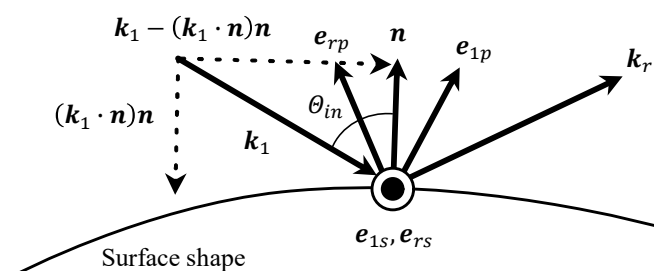


Fig. 3.20 Wave vector and polarization direction on surface

$$\mathbf{M}_{1r} = \begin{bmatrix} \mathbf{e}_{1p} \cdot \mathbf{e}_{1A} & \mathbf{e}_{1p} \cdot \mathbf{e}_{1B} \\ \mathbf{e}_{1s} \cdot \mathbf{e}_{1A} & \mathbf{e}_{1s} \cdot \mathbf{e}_{1B} \end{bmatrix} \quad (3.36)$$

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 の法則から次式により計算される.

$$\begin{pmatrix} E_{rp} \\ E_{rs} \end{pmatrix} = \mathbf{M}_R \begin{pmatrix} E_{1p} \\ E_{1s} \end{pmatrix} \quad (3.37)$$

ここで, R_p と R_s をそれぞれ p 偏光, s 偏光に関する Fresnel 係数として, \mathbf{M}_R は次式により得られる.

$$\mathbf{M}_R = \begin{bmatrix} R_p & 0 \\ 0 & R_s \end{bmatrix} \quad (3.38)$$

R_p と R_s は, 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.

$$R_p = \frac{n_c \cos \theta_{in} - n_0 \cos \theta_c}{n_c \cos \theta_{in} + n_0 \cos \theta_c} \quad (3.39)$$

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

θ_c は複素屈折角で, 次式により求められる.

$$n_0 \sin \theta_{in} = n_c \sin \theta_c \quad (3.40)$$

E_{rp} と E_{rs} が P に作る電場を考える. 一般に正反射光の波数ベクトル \mathbf{k}_r は表面上の点によって向きが異なり, さらに \mathbf{k}_2 とも向きが異なるため, E_{rp} と E_{rs} を単純に式(3.30)で足し合わせることはできない. そこで, 図 3.21 に示すように \mathbf{k}_r と \mathbf{k}_2 の両方を含む平面 $F(\mathbf{k}_r, \mathbf{k}_2)$ を考える. 表面上の点 \mathbf{x} での正反射光の偏光方向を取り直すことを考え, $F(\mathbf{k}_r, \mathbf{k}_2)$ の法線方向の単位ベクトルを $\mathbf{e}_{r\perp}$, \mathbf{k}_r と $\mathbf{e}_{r\perp}$ の両方に垂直な方向の単位ベクトルを $\mathbf{e}_{r\parallel}$ とおく. $\mathbf{e}_{r\perp}$ と $\mathbf{e}_{r\parallel}$ 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 $\mathbf{e}_{2\perp}$, $\mathbf{e}_{2\parallel}$, $E_{2\perp}$, $E_{2\parallel}$ を定める.

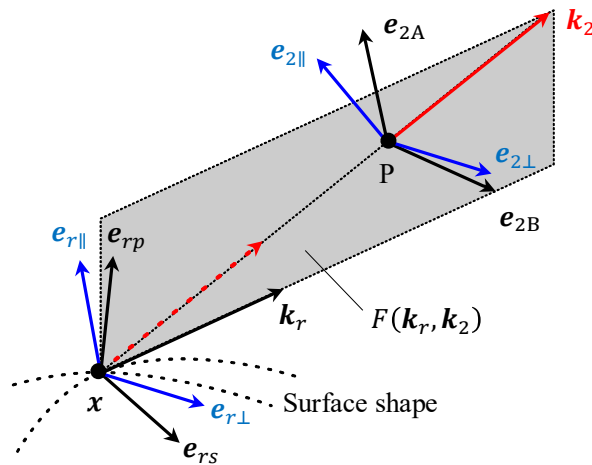


Fig. 3.21 Plane $F(\mathbf{k}_r, \mathbf{k}_2)$ and polarization direction of reflected light

E_{rp} , E_{rs} と $E_{r\perp}$, $E_{r\parallel}$ の関係は、式 (3.35) と同様に考えて次式によりあらわされる.

$$\begin{pmatrix} E_{r\perp} \\ E_{r\parallel} \end{pmatrix} = \mathbf{M}_{r\perp\parallel} \begin{pmatrix} E_{rp} \\ E_{rs} \end{pmatrix} \quad (3.41)$$

ここで $\mathbf{M}_{r\perp\parallel}$ は次式により得られる.

$$\mathbf{M}_{r\perp\parallel} = \begin{bmatrix} \mathbf{e}_{r\perp} \cdot \mathbf{e}_{rp} & \mathbf{e}_{r\perp} \cdot \mathbf{e}_{rs} \\ \mathbf{e}_{r\parallel} \cdot \mathbf{e}_{rp} & \mathbf{e}_{r\parallel} \cdot \mathbf{e}_{rs} \end{bmatrix} \quad (3.42)$$

また, $\nabla E_{r\perp}$ と $\nabla E_{r\parallel}$ は Beckmann の理論と同様に考えて、次式により求められる.

$$\nabla E_{r\perp} = i\mathbf{k}_r E_{r\perp}, \quad \nabla E_{r\parallel} = i\mathbf{k}_r E_{r\parallel} \quad (3.43)$$

$E_{r\perp}$, $E_{2\perp}$, $E_{r\parallel}$ 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 (3.31) に式 (3.33), (3.34), (3.41), (3.43) を代入すると、以下の関係が成り立つ.

$$\begin{pmatrix} dE_{2\perp}(\mathbf{P}, \mathbf{x}) \\ dE_{2\parallel}(\mathbf{P}, \mathbf{x}) \end{pmatrix} = i \frac{e^{ik|\mathbf{D}|-ik_2 \cdot \mathbf{x}}}{4\pi|\mathbf{D}-\mathbf{x}|} \mathbf{v} \cdot \mathbf{n} \begin{pmatrix} E_{r\perp} \\ E_{r\parallel} \end{pmatrix} d\Sigma \quad (3.44)$$

ここで \mathbf{v} は次式に示す通り、入射光と反射光の波数ベクトルの差である.

$$\mathbf{v} = \mathbf{k}_1 - \mathbf{k}_2 \quad (3.45)$$

式 (3.44) の左辺の電場を \mathbf{e}_{2A} の方向と \mathbf{e}_{2B} の方向で取り直すと次式が得られる.

$$\begin{pmatrix} dE_{2A}(\mathbf{P}, \mathbf{x}) \\ dE_{2B}(\mathbf{P}, \mathbf{x}) \end{pmatrix} = \mathbf{M}_{\perp\parallel 2} \begin{pmatrix} dE_{2\perp}(\mathbf{P}, \mathbf{x}) \\ dE_{2\parallel}(\mathbf{P}, \mathbf{x}) \end{pmatrix} \quad (3.46)$$

ここで $\mathbf{M}_{\perp\parallel 2}$ は、 $F(\mathbf{k}_r, \mathbf{k}_2)$ に沿った基底 $\mathbf{e}_{2\perp}$, $\mathbf{e}_{2\parallel}$ から、 \mathbf{P} で基準となる偏光方向 \mathbf{e}_{2A} , \mathbf{e}_{2B} への変換をあらわし、次式により得られる.

$$\mathbf{M}_{\perp\parallel 2} = \begin{bmatrix} \mathbf{e}_{2A} \cdot \mathbf{e}_{2\perp} & \mathbf{e}_{2A} \cdot \mathbf{e}_{2\parallel} \\ \mathbf{e}_{2B} \cdot \mathbf{e}_{2\perp} & \mathbf{e}_{2B} \cdot \mathbf{e}_{2\parallel} \end{bmatrix} \quad (3.47)$$

最終的に、視点 \mathbf{P} での電場の振幅 $E_{2A}(\mathbf{P})$, $E_{2B}(\mathbf{P})$ は次式を計算して得られる.

$$\begin{pmatrix} E_{2A}(\mathbf{P}) \\ E_{2B}(\mathbf{P}) \end{pmatrix} = \int_{\Sigma(\alpha)} \begin{pmatrix} dE_{2A}(\mathbf{P}, \mathbf{x}) \\ dE_{2B}(\mathbf{P}, \mathbf{x}) \end{pmatrix} \quad (3.48)$$

式 (3.48) に、式 (3.46), (3.44), (3.41), (3.37), (3.35) の順に代入すると、次式が得られる.

$$\begin{pmatrix} E_{2A}(\mathbf{P}) \\ E_{2B}(\mathbf{P}) \end{pmatrix} = \mathbf{M} \begin{pmatrix} E_{1A} \\ E_{1B} \end{pmatrix} \quad (3.49)$$

ただし、 \mathbf{M} は 2 行 2 列の行列で、次式により得られる.

$$\mathbf{M} = \frac{ie^{ik|\mathbf{D}|}}{4\pi} \int_{\Sigma(\alpha)} \mathbf{M}_{\perp\parallel 2} \mathbf{M}_{r\perp\parallel} \mathbf{M}_R \mathbf{M}_{1r} \frac{\mathbf{v} \cdot \mathbf{ne}^{iv \cdot \mathbf{x}}}{|\mathbf{D}-\mathbf{x}|} d\Sigma \quad (3.50)$$

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

$$I_{\text{out}}(\mathbf{P}, \alpha, \lambda) = |E_{2A}(\mathbf{P})|^2 + |E_{2B}(\mathbf{P})|^2 = \overline{(E_{1A} \ E_{1B})} \mathbf{M}^* \mathbf{M} \begin{pmatrix} E_{1A} \\ E_{1B} \end{pmatrix} \quad (3.51)$$

により得られる. ただし、 \mathbf{M}^* は \mathbf{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. この場合の反射光の強度を $\langle I_{\text{out}}(\mathbf{P}, \alpha, \lambda) \rangle$ とおくと、入射光の偏光方向に

ついて $I_{\text{out}}(\mathbf{P}, \alpha, \lambda)$ を平均化することで以下のように計算できる。まず、入射光がある角度 φ に偏光している場合、入射光の電場の振幅 E_{1A} , E_{1B} は、 $E_1 = \sqrt{E_{1A}^2 + E_{1B}^2}$ とおいて次式のようにあらわされる。

$$\begin{pmatrix} E_{1A} \\ E_{1B} \end{pmatrix} = E_1 \begin{pmatrix} \cos \varphi \\ \sin \varphi \end{pmatrix} \quad (3.52)$$

このとき、視点 \mathbf{P} での反射光の電場の振幅 $E_{2A}(\mathbf{P})$, $E_{2B}(\mathbf{P})$ は次式により得られる。

$$\begin{pmatrix} E_{2A}(\mathbf{P}) \\ E_{2B}(\mathbf{P}) \end{pmatrix} = \mathbf{M} E_1 \begin{pmatrix} \cos \varphi \\ \sin \varphi \end{pmatrix} \quad (3.53)$$

\mathbf{P} での反射光の強度 $|E_{2A}(\mathbf{P})|^2 + |E_{2B}(\mathbf{P})|^2$ は、次式により計算される。

$$\begin{aligned} |E_{2A}(\mathbf{P})|^2 + |E_{2B}(\mathbf{P})|^2 &= \overline{(E_{2A}(\mathbf{P}) \quad E_{2B}(\mathbf{P}))} \begin{pmatrix} E_{2A}(\mathbf{P}) \\ E_{2B}(\mathbf{P}) \end{pmatrix} \\ &= |E_1|^2 (\cos \varphi \quad \sin \varphi) \mathbf{M}^* \mathbf{M} \begin{pmatrix} \cos \varphi \\ \sin \varphi \end{pmatrix} \end{aligned} \quad (3.54)$$

式(3.54)の右辺を、入射光の偏光方向をあらわす角度 φ について $0 \sim 2\pi$ の範囲で平均化することで、次式に示す通り $\langle I_{\text{out}}(\mathbf{P}, \alpha, \lambda) \rangle$ が得られる。

$$\langle I_{\text{out}}(\mathbf{P}, \alpha, \lambda) \rangle = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} (|E_{2A}(\mathbf{P})|^2 + |E_{2B}(\mathbf{P})|^2) d\varphi = \frac{\text{tr}(\mathbf{M}^* \mathbf{M})}{2} I_{\text{in}}(\lambda) \quad (3.55)$$

3.4.6.3 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 (3.50) を計算することは困難であるため、3.4.2 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 $\Sigma_{i,j}$ で行列 \mathbf{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 (3.50) の積分計算の中で $e^{i\mathbf{v} \cdot \mathbf{x}}$ と $|\mathbf{D} - \mathbf{x}|$ 以外は一定である。さらに \mathbf{x} の変化量は \mathbf{D} のスケールに比べ非常に小さい。例えば、観察距離 $|\mathbf{D}|$ のスケールが数百 mm であるのに対し $\Sigma_{i,j}$ 内で \mathbf{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 $|\mathbf{D} - \mathbf{x}|$ も一定であるとみなしてよい。

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

$$\begin{aligned} \mathbf{M}_{i,j} &\approx \frac{\mathbf{v} \cdot \mathbf{n}_{i,j}}{4\pi|\mathbf{D} - \mathbf{x}_{i,j}|} \mathbf{M}_{\perp\parallel 2} \mathbf{M}_{r\perp\parallel} \mathbf{M}_R \mathbf{M}_{1r} \int_{\Sigma_{i,j}} e^{i\mathbf{v} \cdot \mathbf{x}} d\Sigma \\ &= \frac{-v_x A_{i,j} - v_y B_{i,j} + v_z}{4\pi|\mathbf{D} - \mathbf{x}_{i,j}|} \mathbf{M}_{\perp\parallel 2} \mathbf{M}_{r\perp\parallel} \mathbf{M}_R \mathbf{M}_{1r} \\ &\quad \times (2L)^2 \text{sinc}[(v_x + A_{i,j} v_z) L_{xy}] \text{sinc}[(v_y + B_{i,j} v_z) L_{xy}] \exp[i\mathbf{v} \cdot \mathbf{x}_{i,j}] \end{aligned} \quad (3.56)$$

ここで $\mathbf{n}_{i,j}$ は $\mathbf{x}_{i,j}$ での法線ベクトルである。 v_x , v_y , v_z はそれぞれ式(3.45)で定義した、入射光と反射光の波数ベクトルの差 \mathbf{v} の x , y , z 成分である。また、 $\text{sinc}(x)$ は sinc 関数であり、次式により定義される。

$$\text{sinc}(x) = \frac{\sin x}{x} \quad (3.57)$$

次に、画素 $Q(\alpha)$ について \mathbf{M} を計算する。 \mathbf{M} の積分範囲を $\Sigma(\alpha)$ とすればよいが、3.4.3 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の、次式のように計算できる。

$$\mathbf{M}(\alpha) = \sum_{(i,j)=i(\alpha),j(\alpha)} \mathbf{M}_{i,j} \quad (3.58)$$

したがって $I_{\text{out}}(\mathbf{P}, \alpha, \lambda)$ を求めるには、まず式 (3.56) により $\mathbf{M}_{i,j}$ を計算し、次に式 (3.58) により $\mathbf{M}(\alpha)$ を求め式 (3.51) に代入すればよい。本論文では偏光のない場合を考え、式 (3.55)により得られる $\langle I_{\text{out}}(\mathbf{P}, \alpha, \lambda) \rangle$ を用いる。

3.5 結論

本章では、官能評価における心理物理的な過程として、人間の視覚系の神経経路の構造と視覚情報の処理の流れ、および視覚情報を定量化する規格についてまとめた。物理的な過程として、視覚シミュレーションの工程の参考とするため、一般的な CG の工程についてまとめた。以上の知識に基づいて視覚シミュレーション手法を構築した。得られた結論を以下に示す。

- 1) 明所視ではたらく視細胞は錐体とよばれる。錐体には感知する光の波長帯の異なる 3 種類があり、L, M, S 錐体とよばれ存在比率はおおよそ 32:16:1 である。錐体は網膜上で視野の中心にあたる部分で最も密に分布しており、間隔は視野角で約 0.5 分である。
- 2) 人間の視覚情報は輝度と色の 2 つであり、対象物の分光放射輝度にそれぞれ視感度、等色関数を乗じることで計算される。
- 3) 一般的な CG においてシェーディングの工程では、表面の形状を平均化し表面粗さをあらかずパラメータを求めて反射光の強度を計算している。この点は切削加工面の微視的な形状を考慮する上で適していないと考えられる。そこで Beckmann の散乱理論により形状データを平均化せずに反射光の強度を計算する。
- 4) 構築した視覚シミュレーション手法の主な特徴は、心理物理的な過程については錐体の間隔を参考として視覚情報の空間分解能を決定している点と、物理的な過程については Beckmann の散乱理論により表面の形状を平均化せずに反射光の強度を計算している点である。

第4章 光沢の度合いの解析

4.1 緒論

光沢は、表面に強い正反射光があるときに人間が感じる、表面の感覚的な特徴である[55]。光沢の度合いを定量的に評価する指標として光沢度が定められている[56]。光沢度は、定められた入射角における入射光に対する正反射光の強度の比を用いて光沢の度合いを評価したものであるが、切削加工面の官能評価において評価者は様々な方向で加工面を観察することがある。

光沢の度合いを定量化する手法は、表面の巨視的な形状によって異なることが知られている。巨視的な形状が肉眼で明らかに見える場合に、1つの方向で表面を観察したときの輝度の分布を用いて光沢の度合いを定量化する手法が研究されている[57]。一方で、巨視的な形状のスケールが小さく見えない場合の光沢の度合いの評価方法として、照明光の角度を一定として観察角度を変化させたときの輝度をプロットする手法がある[58]。この輝度の曲線を反射輝度分布曲線とよぶ。切削加工面に置き換えれば、カusp形状のスケールが大きく肉眼で見える場合には前者の手法を、カusp形状のスケールが小さく肉眼で見えない場合は後者の手法が適していると考えられる。

本章では旋削加工面とボールエンドミル加工面を対象とし、カusp形状のスケールが小さく肉眼で見えない場合に、加工面の微視的な形状が原因となる光沢の度合いの差を解析する。旋削加工面については、加工条件による影響を調査する。異なる切削速度で加工した場合に微視的な形状が変化することで生じる光沢の度合いの差について、形状データから反射光の強度分布および反射輝度分布曲線を計算し解析する。解析結果から、外観の差を明確に見出せるような撮影方法を予測し、写真データの傾向が計算結果と一致するかを検証する。ボールエンドミル加工面については、異なる材質の工具を用いて切削した、微視的な形状の異なる面の光沢の度合いの差を解析する。解析結果から、外観の差を明確に認識できる観察セットアップを予測し、官能評価により検証する。

本章の構成は以下の通りである。4.2節では、反射輝度分布曲線と輝度対比弁別閾を用いて光沢の度合いを解析する手法について述べる。4.3節では、アルミニウム合金 A2017 旋削加工面について加工条件の違いによる光沢の度合いの差を解析する。4.4節では、異なる材質のボールエンドミルを用いて切削した加工面の光沢の度合いを解析する。4.5節は以上の内容をまとめた結論である。

4.2 光沢の度合いの解析方法

4.2.1 反射輝度分布曲線

蓮沼[58]によれば、表面に巨視的な形状が視認できない場合、固定された照明光の下で光沢の強い面と弱い面を様々な角度で観察したとき、観察角度に対する輝度の変化には図 4.1

に示すような違いがある。光沢の度合いの高い面では正反射の角度で観察した場合に輝度が高く、観察角度が変化すると比較的急峻に輝度が小さくなる。他方で光沢の度合いの低い面では、正反射での輝度が比較的小さく、観察角度に対する輝度の変化は比較的緩やかである。観察角度に対して輝度をプロットしたグラフを反射輝度分布曲線（Angular luminance distribution）とよぶ[58]。視覚シミュレーションを利用して輝度分布を計算し反射輝度分布曲線を描くことで、光沢の度合いを定量的に説明できると考えられる。

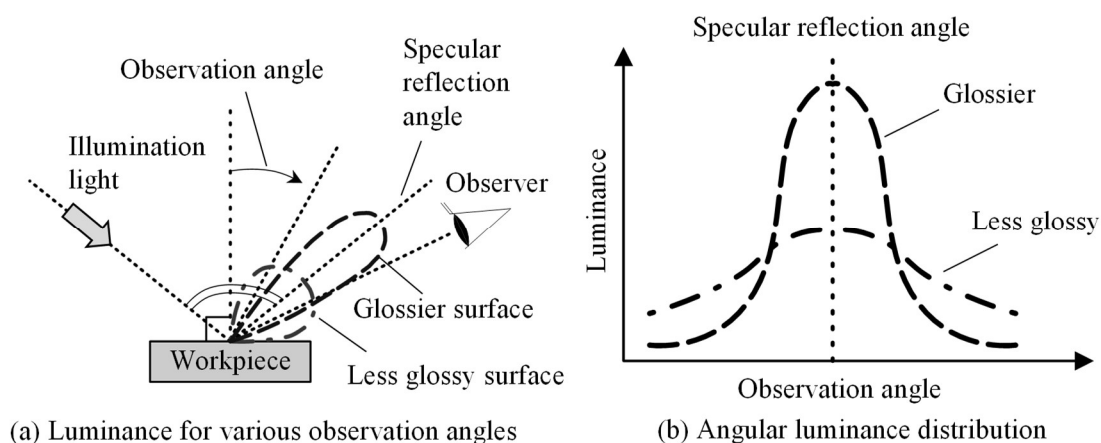


Fig. 4.1 Difference in luminance between glossier and less glossy surfaces

図 4.2 に光沢の度合いを解析する手順を示す。まず視覚シミュレーションの入力データを測定または決定する。解析対象の切削加工面については形状および屈折率を測定する。照明光については強度の波長分布を測定し、方向を定める。観察者については、加工面からと距離と観察角度を定める。ここで、観察角度は正反射の角度方向を含む様々な角度とする。以上の入力データを用いて視覚シミュレーションをおこない、それぞれの観察角度での輝度分布、すなわち画素 $Q(\alpha)$ それぞれに対する輝度 $L(\alpha)$ を計算する。本研究ではカusp形状のスケールが小さく肉眼で見えない場合を考えているため、平均的な輝度を評価することとし、計算で得られた輝度を次式により平均して平均輝度 \bar{L} を求める。

$$\bar{L} = \sum_{\alpha} L(\alpha) \quad (4.1)$$

正反射を含む様々な観察角度に対して \bar{L} をプロットすることで反射輝度分布曲線を描き、光沢の度合いを評価する。

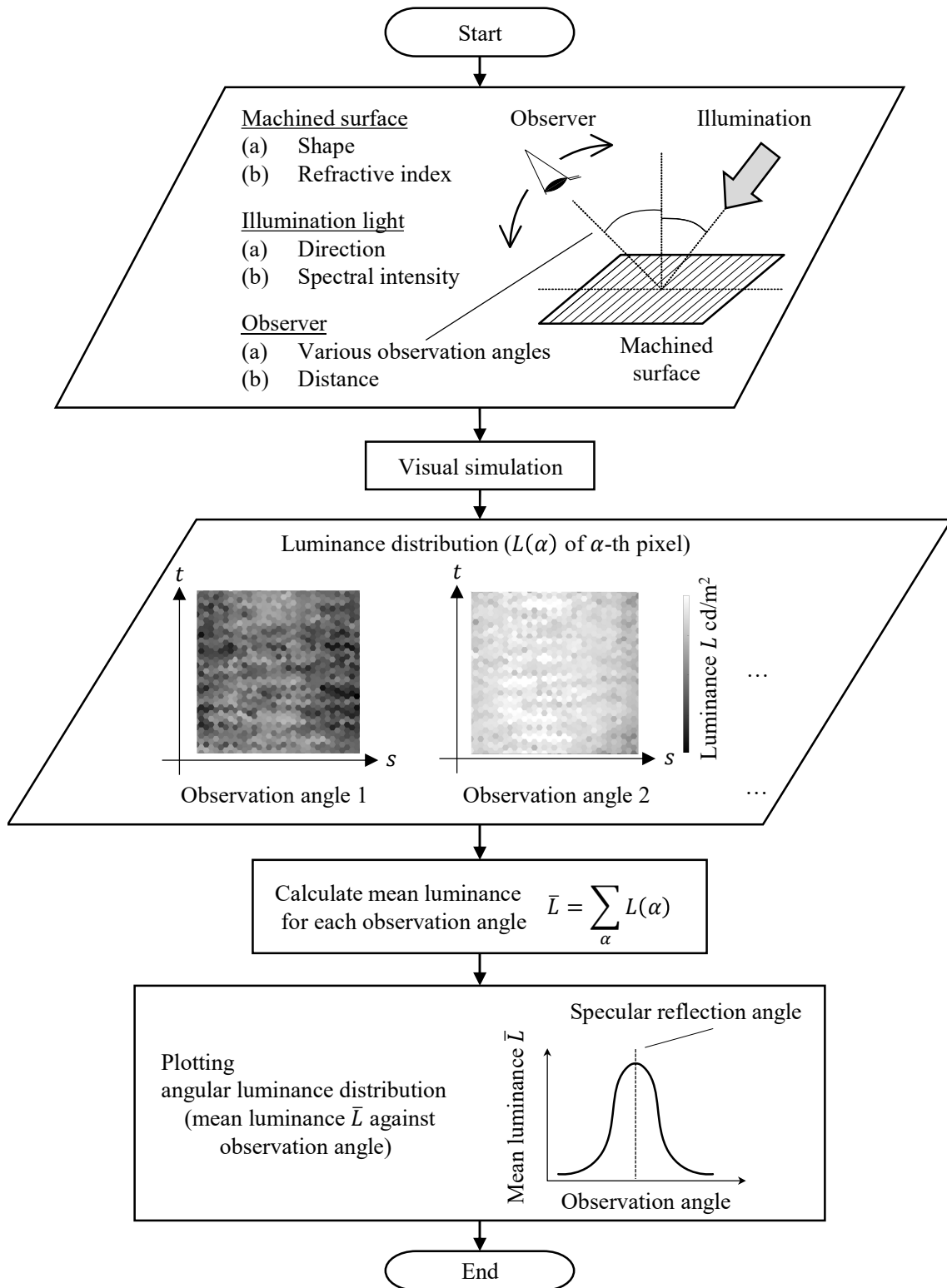


Fig. 4.2 Procedure to analyze gloss degree

4.2.2 輝度対比弁別閾

反射輝度分布曲線にどれほどの差があれば光沢の度合いが異なると判定されるかについて、輝度対比弁別閾が参考となる。異なる輝度の領域が隣り合ったとき、その輝度の差が十分大きければ人間は2つの領域が異なると知覚する。輝度対比弁別閾は、人間がどれほどのわずかな輝度の差までを認識できるかを示すものである[41]。

輝度対比弁別閾は、背景の輝度 L_b を基準として、対象物の輝度 L_o がどの程度異なれば背景と対象物を弁別できるかを示す。 L_b と L_o の差を $\Delta L = |L_b - L_o|$ とおき、対象物を弁別できる最小の ΔL を $(\Delta L)_{\min}$ とおくと、輝度対比弁別閾 \bar{C}_{\min} は次式により計算される[59]。

$$\bar{C}_{\min} = \frac{(\Delta L)_{\min}}{L_b} \quad (4.2)$$

輝度対比弁別閾は背景輝度によって異なり、また対象物の大きさや観察時間の影響も受ける。CIE が標準的な目の輝度対比弁別閾として示しているデータ[59]では、明所視に相当する、背景輝度が 10^1 cd/m^2 以上の領域では輝度対比弁別閾は約 0.1 で一定である。すなわち、背景輝度を基準として対象物の輝度が約 10%異なれば識別できることになる。

反射輝度分布曲線を用いて光沢の度合いの差を評価する際、それぞれの観察角度について輝度の差が、どちらかの加工面を基準として、輝度対比弁別閾である 10%を上回るかを判定することで、評価者が輝度の差を認識するかを予測できると考えられる。

4.3 旋削加工面の光沢の度合いの解析

4.3.1 実験の目的と方法

加工条件による加工面の外観の違いについて調べるため、A2017 丸棒を外径旋削した。図 4.3 に旋削のセットアップを、表 4.1 に加工条件を示す。得られた加工面に対し、初心者（機械工学系の大学院生、加工歴は約 1 年）と熟練者（大学の技術職員、加工歴は約 30 年）が目視により官能評価をおこなった。表面粗さ計（先端径：5 μm ，空間分解能：1 μm ）を用いて、送り方向の断面形状を測定した。また、レーザ顕微鏡により加工面形状を条件ごとに 3 箇所ずつ測定し、同時に加工面を観察した。表 4.2 にレーザ顕微鏡の測定条件を示す。

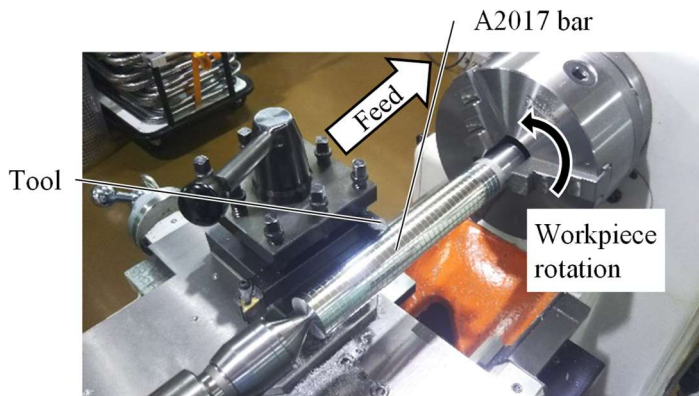


Fig. 4.3 Setup for turning aluminum bar

Table 4.1 Turning conditions of the aluminum bar

Workpiece material	A2017
Workpiece diameter	40 mm
Tool	Mono crystal diamond, flat
Rotation speed	83, 155, 270, 560, 1030, 1800 rpm
Feed	0.08 mm/rev. for all rotation speed 0.1, 0.2 mm/rev. for only 1800 rpm
Depth of cut	Estimated to be 20-25 μm
Coolant	Dry

Table 4.2 Measurement conditions of laser microscope for the turned aluminum bar

Laser wavelength	405 nm
Measurement area size	0.625 mm \times 0.625 mm
Spatial resolution $2L_{xy}$	0.625 μm
Hight measurement resolution	0.3 μm

4.3.2 実験結果

表 4.3 に初心者と熟練者の評価結果を示す. 初心者の評価には主に「きれいな光沢」と「白っぽい」の 2 種類があることがわかる. また, 熟練者は「推奨条件」と「切れてない」を判別したが, 初心者には判別できなかった. このように, 初心者は感覚に関する言葉のみで評価結果を表現しており, 熟練者は加工状態に言及している. 初心者による評価結果の中で特に顕著な差が見られた「きれいな光沢」と「白っぽい」の違いについて詳細に調査することとし, 以下では条件 1~6 を比較する.

図 4.4 に, 表面粗さ計で測定した加工面形状を示す. 図中で工具の送り方向は右から左に

向かう方向であり，切削方向は紙面に対して手前から奥に向かう方向である．6個の条件に共通して，高さ約2 μm のカस्प形状がみられる．条件1~4ではカस्प形状が整っているように見受けられるのに対し，条件5，6ではサブ μm スケールの微小な凹凸が比較的多いことがわかる．

図4.5，4.6に，レーザ顕微鏡により測定した形状データと観察画像を示す．各条件で3箇所ずつ測定と観察をおこなっており，図にはそれぞれ1番目のデータを示している．図4.5の形状データでは，図4.4に示した断面形状と同様に，工具が通過することにより形成されたカस्प形状が見受けられるが，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，カस्प形状の高さ約2 μm に比べ小さいためであると考えられる．図4.6に示す観察画像では，いずれの条件でもカस्प形状の中に微細な条痕があり，特に条件5，6で条痕が多いことがわかる．この傾向は，図4.4に示した表面粗さ計で測定した断面形状データの傾向と一致する．

Table 4.3 Result of sensory evaluation on turned aluminum bar by a beginner and an expert

Condition	Rotation speed rpm	Feed mm/rev.	Comments of beginner	Comments of expert
1	1800	0.08	きれいな光沢 Clearly glossy.	-
2	1030	0.08	きれいな光沢 Clearly glossy.	-
3	560	0.08	きれいな光沢 Clearly glossy.	-
4	270	0.08	きれいな光沢 Clearly glossy.	-
5	155	0.08	少し白っぽい A little cloudy.	-
6	83	0.08	一番白っぽい Most cloudy.	-
7	1800	0.2	きれいな光沢. 送りが大きい Clearly glossy. Feed is large.	あ，切れてない Not successfully cut.
8	1800	0.1	きれいな光沢 Clearly glossy.	推奨条件 I recommend.

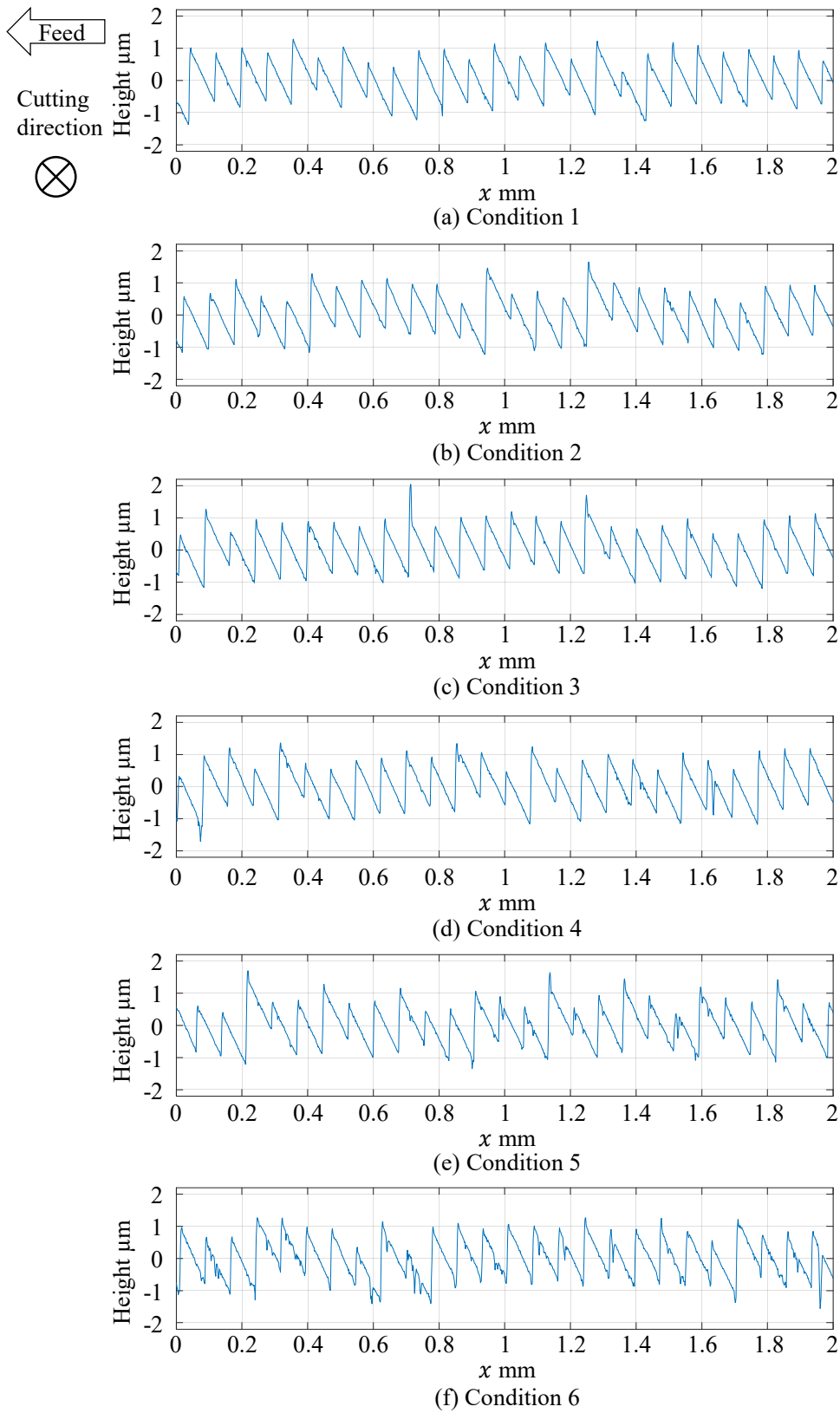


Fig. 4.4 Cross-sectional shape of the turned aluminum bar measured by surface roughness measurer

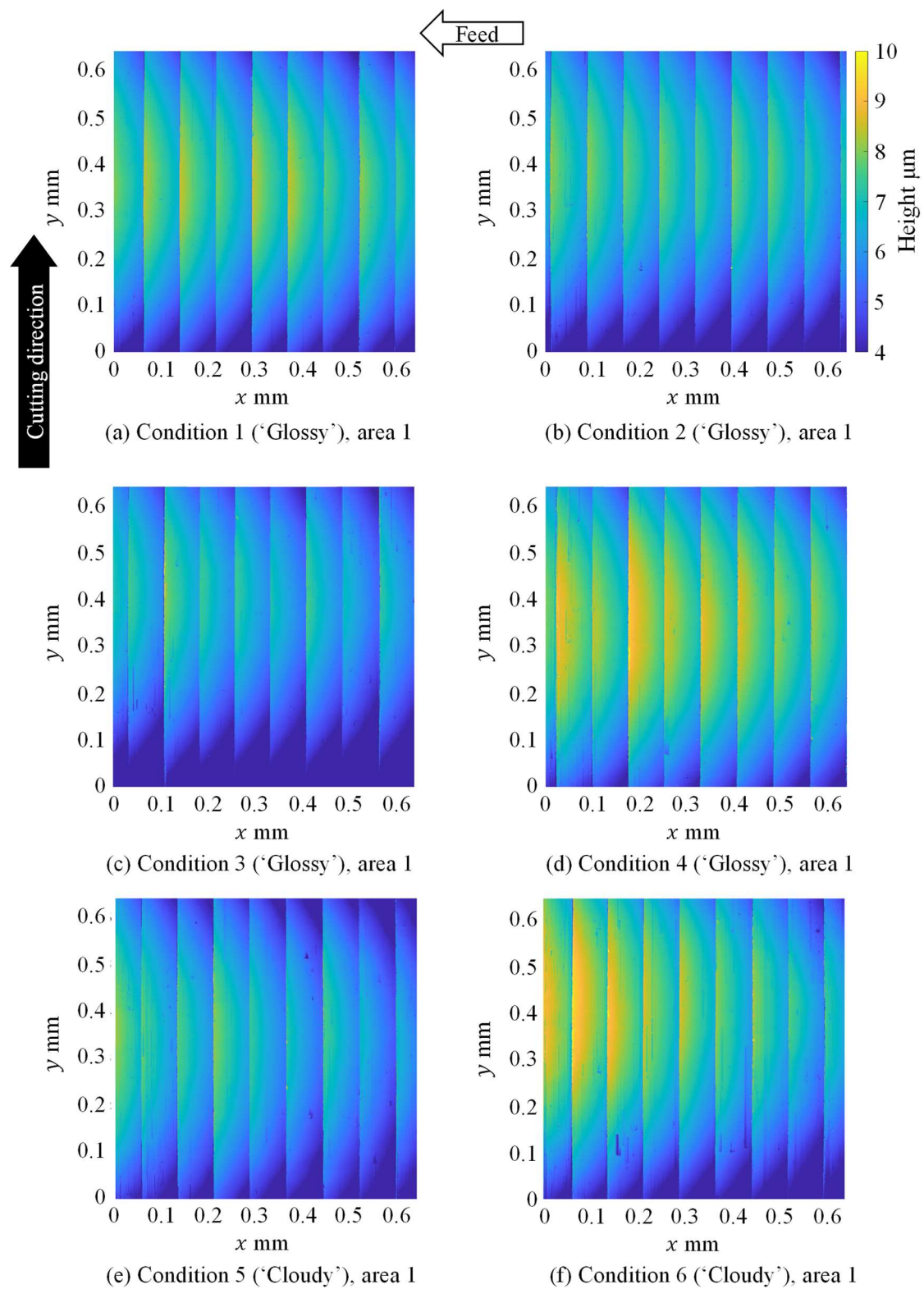


Fig. 4.5 Surface shape of the turned aluminum bar measured by laser microscope

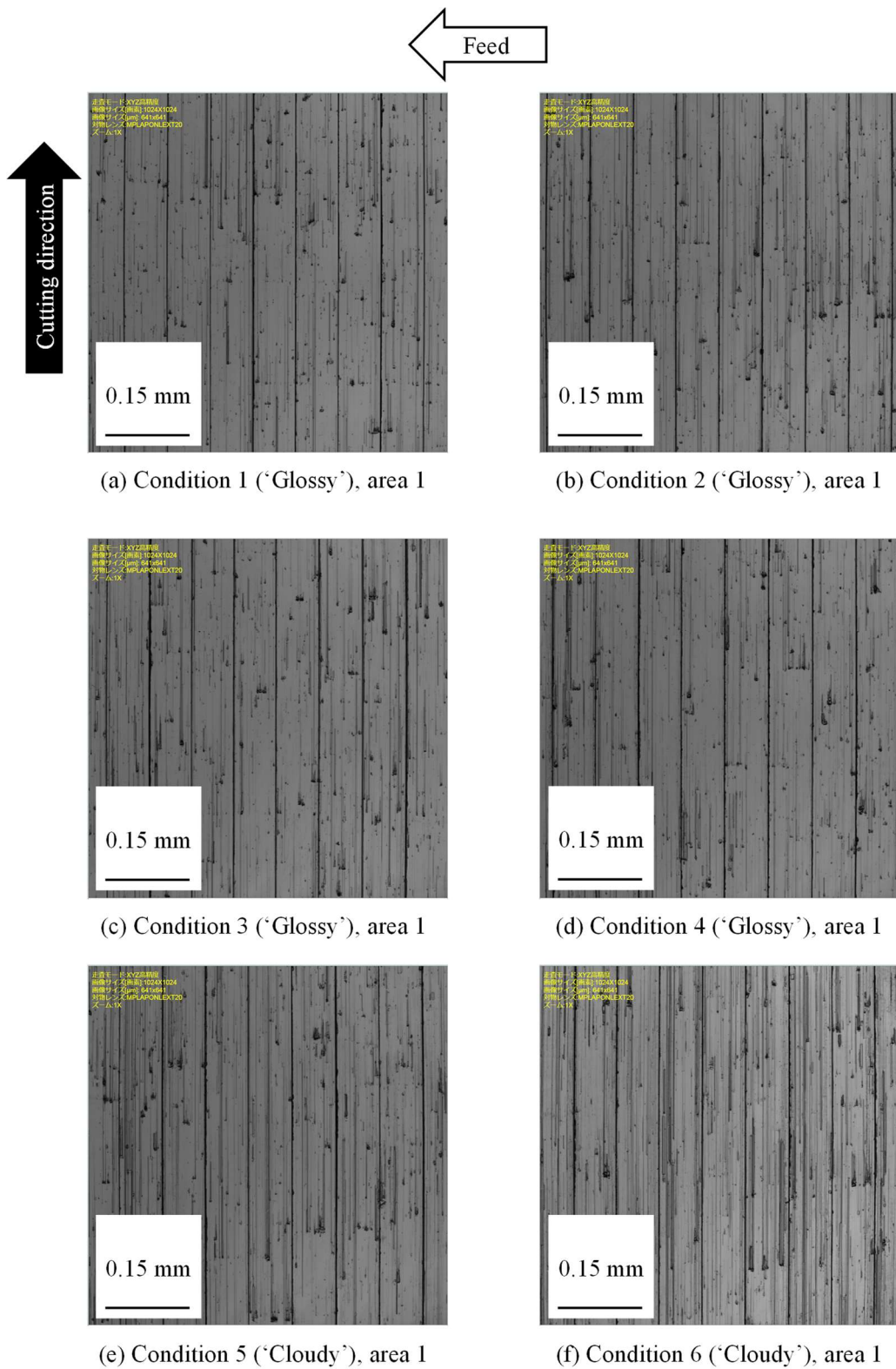


Fig. 4.6 Laser microscope image of the turned aluminum bar

4.3.3 視覚シミュレーションによる光沢の度合いの解析

「きれいな光沢」の条件 1~4 では微細な条痕が比較的少なく、「白っぽい」と評価された条件 5, 6 では比較的条痕が多いことがわかった. 条件 1~4 の加工面は比較的平坦に近く, 正反射光の強度や映り込みなどから光沢の度合いが高いという評価がされたと考えられる. また, 条件 5, 6 では加工面に入射した照明光が微細な条痕により様々な方向へ反射するために正反射光の強度が小さく, 正反射から離れた角度での反射光の強度が大きくなるために, 光沢の度合いが低いと評価されたと考えられる. 以上の考察を検証するため, レーザ顕微鏡で得られた形状データを用いて反射光の強度分布と反射輝度分布曲線を計算する.

4.3.3.1 反射光の強度分布の計算

図 4.5 に示した形状データに対して, レーザ顕微鏡と同様の照明光および観察条件で視覚シミュレーションをおこない, 観察画像と同様の反射光の強度分布が得られるかを調査した.

反射光の強度分布を計算する際には, 空間分解能は形状データと合わせ $2L_{xy} = 0.625 \mu\text{m}$ とした. また, 光の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とらえている. 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. Fresnel 係数については簡単のため $R_p = -1, R_s = 1$ とした.

図 4.5 に示した形状データの各測定点 $x_{i,j}$ に対して, 式(3.50)で得られる行列 $M_{i,j}$ を計算し, 式(3.55)により反射光の強度 $\langle I_{\text{out}} \rangle$ 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 $\langle I_{\text{out}} \rangle|_{z=0}$ を基準として規格化した.

図 4.7 に反射光の強度分布の計算結果を示す. 同図より, 条件 1 から 4 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. それに対して条件 5 と 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 4.6 で観察された条痕と対応がみられ, 視覚シミュレーションにおいて微細な条痕の影響を考慮できると予想される.

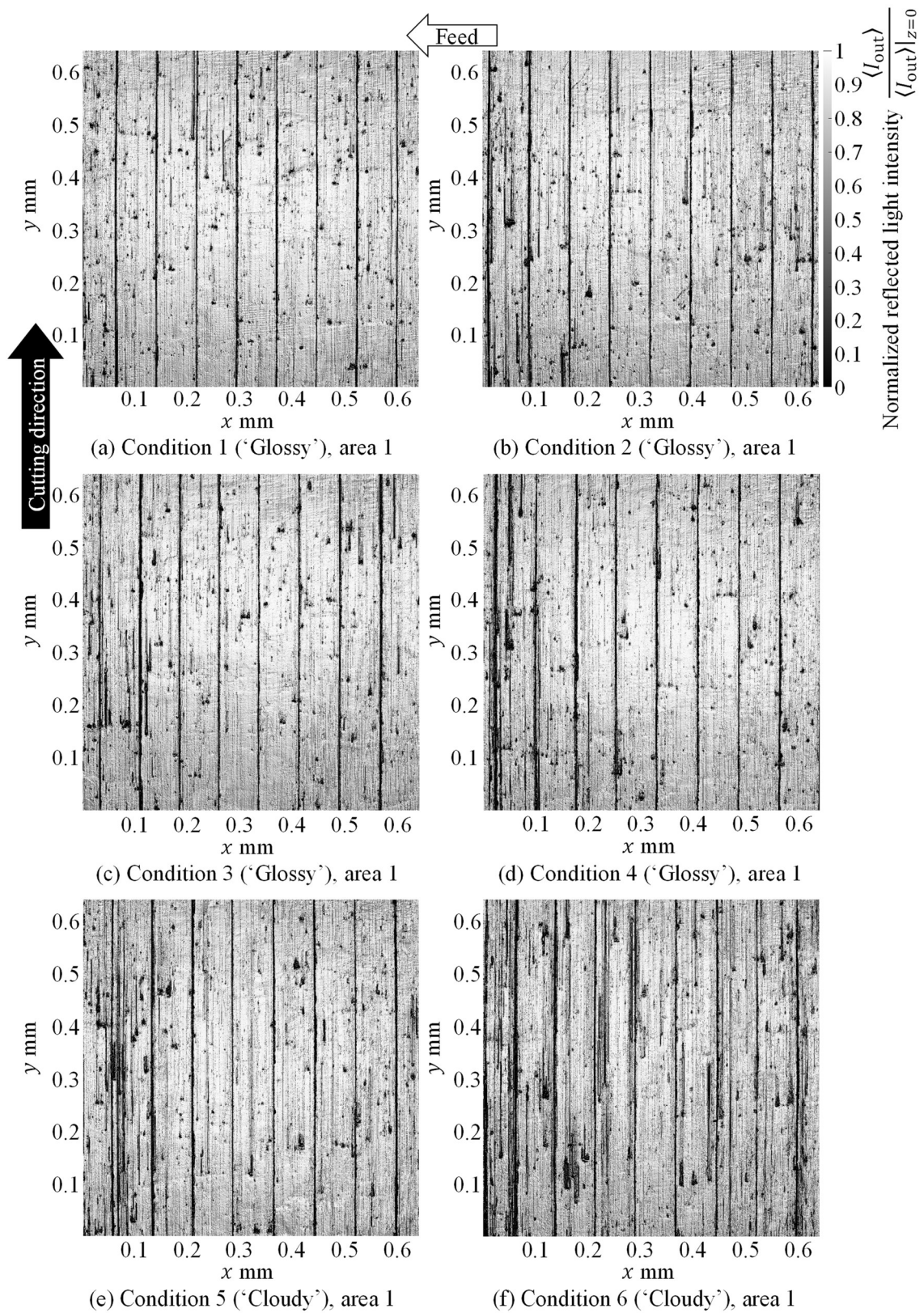


Fig. 4.7 Simulated distribution of normalized reflected light intensity $\langle I_{out} \rangle / \langle I_{out} \rangle_{z=0}$ of the turned aluminum bar when wavelength $\lambda = 405$ nm

4.3.3.2 反射輝度分布曲線の計算

図 4.5 に示した形状データから、視覚シミュレーションを用いて輝度の分布を計算し反射輝度分布曲線を描いた。視覚シミュレーションの入力データとして、屈折率は、Cheng ら[60] がアルミニウムについて測定したデータを用いた。図 4.8 に屈折率のデータを示す。一般に金属の屈折率は複素数となることが知られている[53]。図中で n は屈折率の実部を、 κ は消衰係数（屈折率の虚部に-1 を乗じたもの）をあらわす。照明光強度については、LED 光源の照明光強度を分光放射照度計（測定波長: 380~780 nm, 測定波長間隔: 1 nm）により測定して用いた。図 4.9 に測定結果を示す。図 4.10 に照明光と観察の方向を、表 4.4 に視覚シミュレーションの条件を示す。照明光の方向を $\theta_1 = 20^\circ$ に固定し、観察者が正反射の方向 $\theta_2 = 20^\circ$ を含む様々な方向で観察する場合を考えた。

条件 1~6 について、それぞれ 3 箇所ずつ測定した形状データを用いて、反射輝度分布曲線を描いた。視覚シミュレーションで計算された輝度分布の例として、条件 1, 6 で $\theta_2 = 0^\circ, 20^\circ, 40^\circ$ の場合を図 4.11 に示す。図中で s 軸は観察者に対して水平な方向を、 t 軸は垂直な方向をあらわす。今回の視覚シミュレーションでは s 軸は切削方向に、 t 軸は送り方向に対応する。同図(a2)(b2)に示した正反射の角度 $\theta_2 = 20^\circ$ の場合では条件 1 の平均輝度 \bar{L} が条件 6 を上回っているが、同図(a1)(b1), (a3)(b3)に示した正反射から離れた角度 $\theta_2 = 0^\circ, 40^\circ$ では条件 6 の方が上回っている。

図 4.12 に得られた反射輝度分布曲線を示す。図中で、○印は 3 箇所ずつ計算した平均輝度 \bar{L} の平均を、エラーバーの長さは標準偏差をあらわす。正反射の角度 $\theta_2 = 20^\circ$ では、条件 6 の \bar{L} が条件 1~4 に比べ小さくなっている。また正反射から離れた角度については、例えば $\theta_2 = 0^\circ$ では条件 6 が最も \bar{L} が高い傾向がみられる。したがって、条件 6 の反射輝度分布曲線には、条件 1~4 に比べピークが低く、正反射の方向から離れるにしたがって比較的緩やかに輝度が小さくなる傾向があるため、光沢の度合いが低いと言える。このため、初心者は条件 6 を条件 1~4 とは区別して「白っぽい」と評価したと考えられる。また、条件 5 については、平均的には条件 1~4 と差がみられるが、輝度対比弁別閾の 10%を越えていない。このことが「少し白っぽい」という評価結果と対応している可能性がある。

さらに、旋削面の法線方向に沿って観察する場合について詳細に調べた。反射輝度分布曲線において $\theta_2 = 0^\circ$ では条件 6 の輝度が最も高くなっているが、実際の工場や実験室では様々な方向から照明光が入射する。そこで、 $\theta_2 = 0^\circ$ として固定し、 θ_1 を変化させたときの平均輝度を計算した。図 4.13 に計算結果を示す。 θ_1 の大小によって平均輝度が変化しているが、すべての θ_1 の値で条件 6 が最も高く、条件 5 が 2 番目に高くなっており、それぞれの「一番白っぽい」「少し白っぽい」という評価と対応がみられる。特に条件 6 では、条件 1~4 に比べ 10%以上 \bar{L} が大きいため、輝度の差を明確に認識できると考えられる。なお、条件 3 が条件 1, 2, 4 に比べ 10%以上小さい場合がみられ、輝度の差が認識されると予想されるが、官能評価結果にはその傾向はみられなかった。

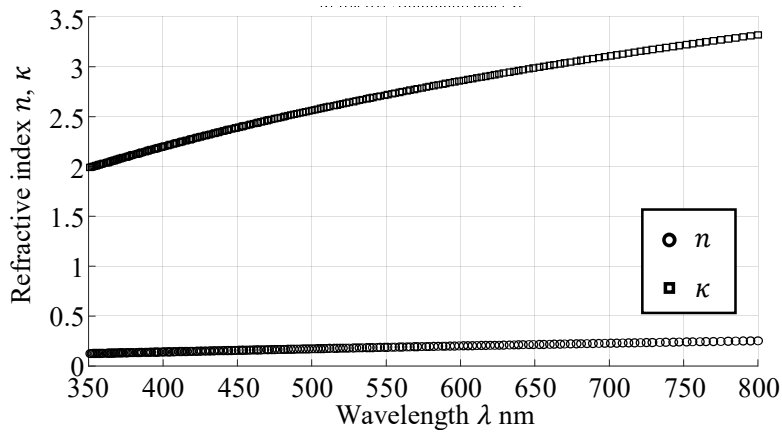


Fig. 4.8 Refractive index of aluminum measured by Cheng et. al. [59]

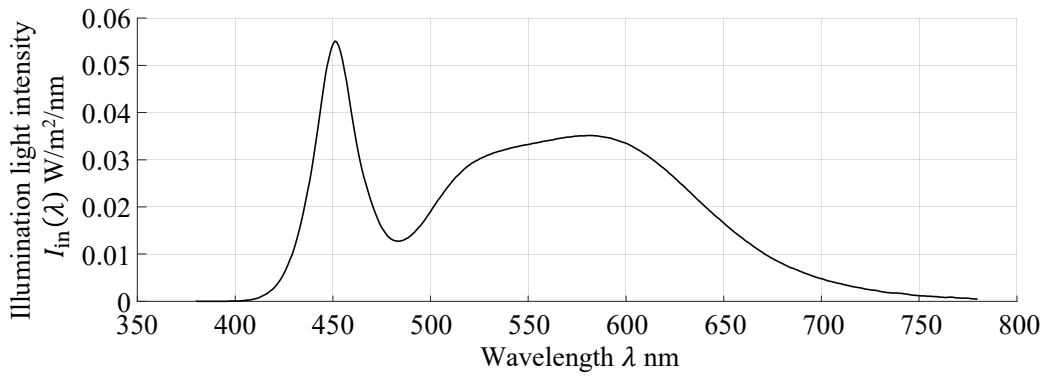


Fig. 4.9 Measured illumination light intensity $I_{in}(\lambda)$ of LED light source for the turned aluminum bar

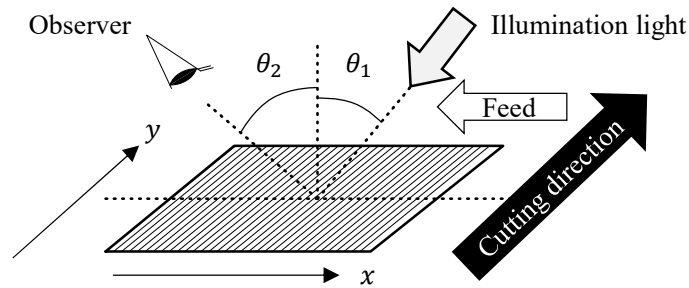


Fig. 4.10 Directions of illumination light and observation in visual simulation for angular luminance distribution of the turned aluminum bar

Table 4.4 Conditions of visual simulation for angular luminance distribution of the turned aluminum bar

Illumination direction	$\theta_0 = 0^\circ, \theta_1 = 20^\circ$
Observation direction	$\theta_2 = 0^\circ, 5^\circ, 10^\circ, \dots, 35^\circ, 40^\circ, \theta_3 = 180^\circ$
Observation distance	$D = 150 \text{ mm}$

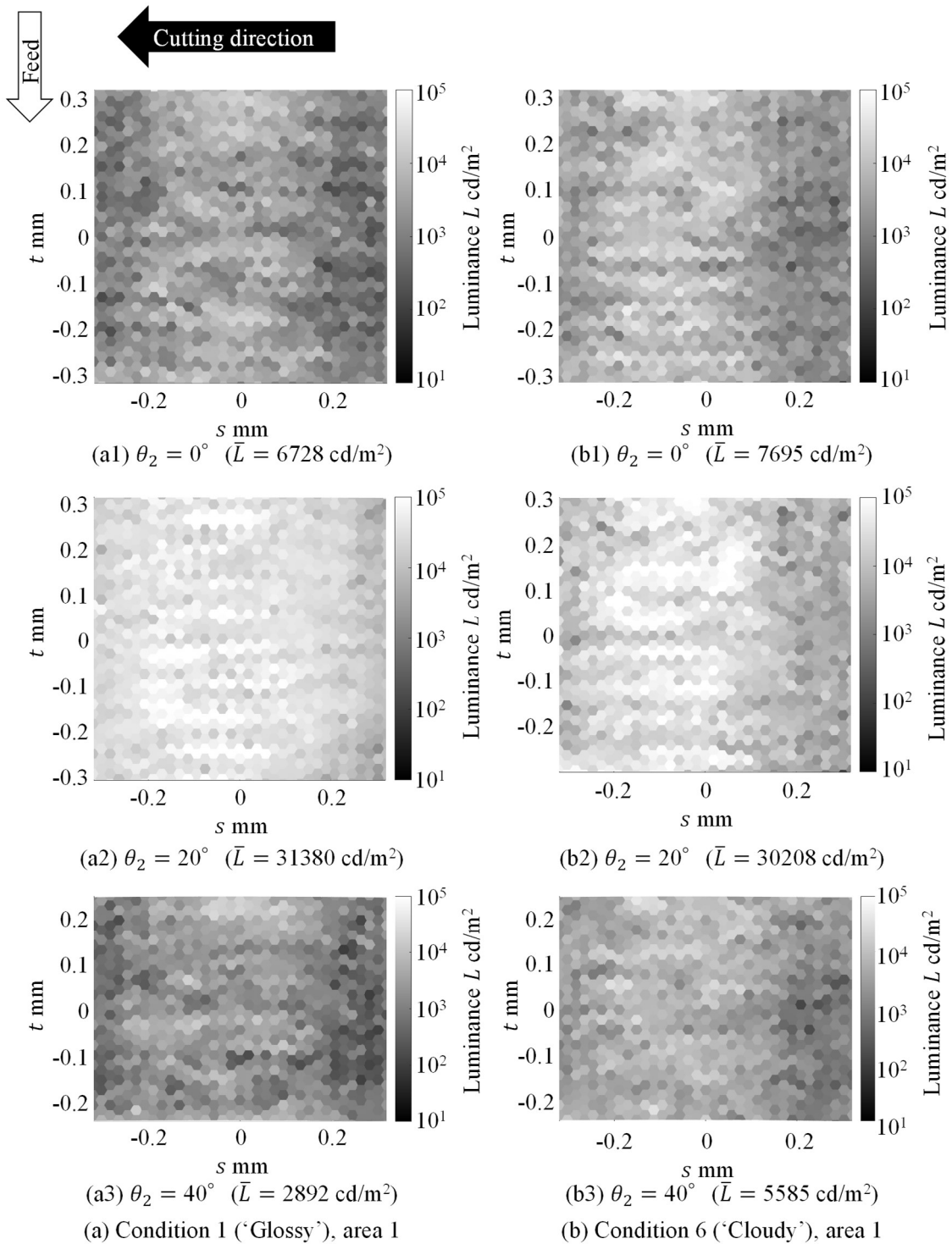


Fig. 4.11 Examples of simulated luminance distribution of conditions 1 and 6 of the turned aluminum bar

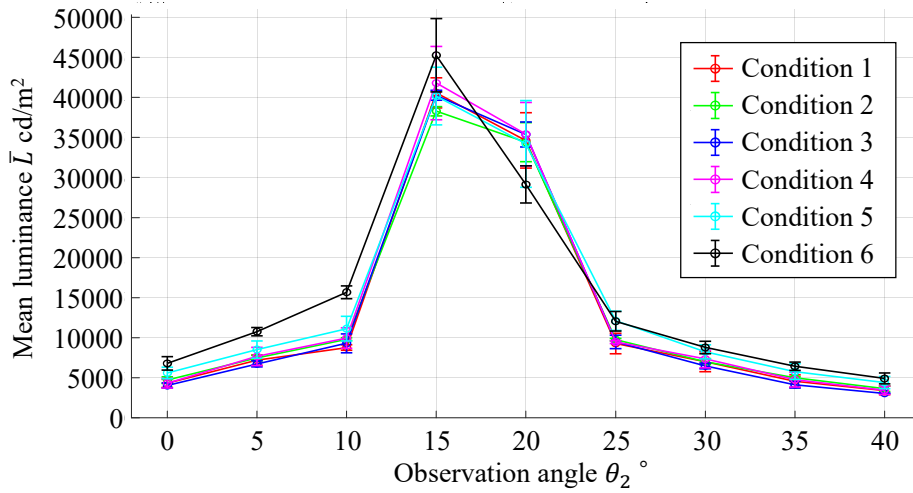
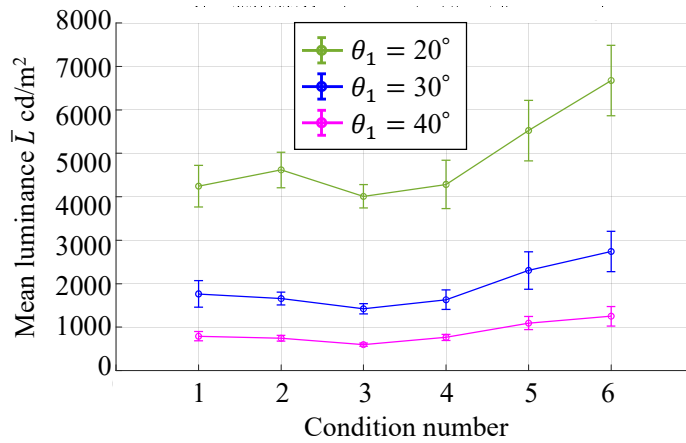
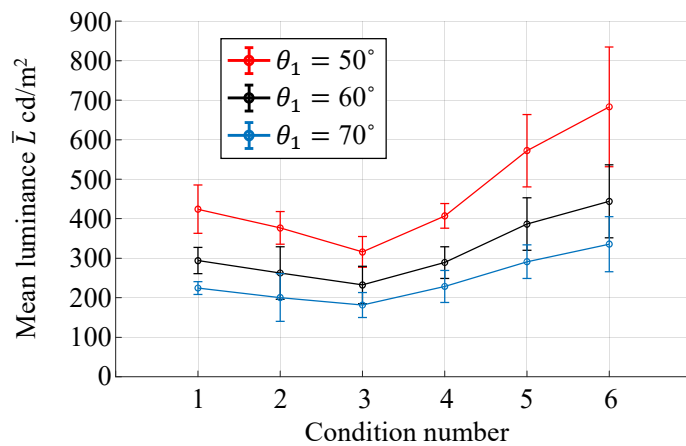


Fig. 4.12 Simulated angular luminance distribution of the turned aluminum bar



(a) Illumination light angle $\theta_1 = 20^\circ, 30^\circ, 40^\circ$



(b) Illumination light angle $\theta_1 = 50^\circ, 60^\circ, 70^\circ$

Fig. 4.13 Simulated mean luminance of the turned aluminum bar when observation angle $\theta_2 = 0^\circ$

また図 4.14 に示すように，加工面の法線方向から周方向に傾いた角度で観察する場合についても視覚シミュレーションをおこない，平均輝度 \bar{L} を計算した．表 4.5 に計算条件を示す．複数の照明光の角度 θ_1 で視覚シミュレーションをおこなった．図 4.15 に計算結果を示す．○印は各条件について 3 箇所ずつ測定した形状データで計算した平均輝度の平均を，エラーバーの長さは標準偏差をあらわす．この場合も条件 5, 6 の平均輝度が他に比べ高い．特に条件 6 の平均輝度は，異なる照明光の角度 θ_1 で共通して条件 1 の約 2 倍である．

図 4.13, 4.15 に示した結果から，加工面の半径方向から観察した場合に輝度の差を明確に見出せると予想される．

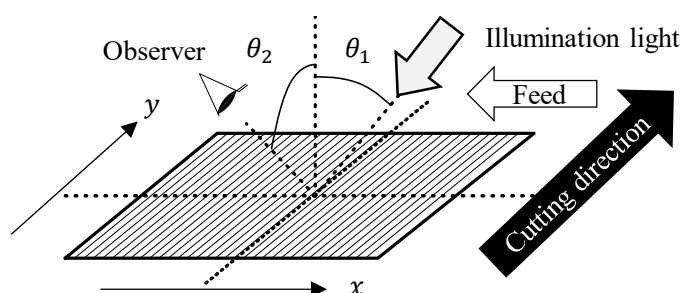


Fig. 4.14 Directions of illumination light and observation in visual simulation on observing the turned aluminum bar in slanted direction

Table 4.5 Conditions of visual simulation on observing the turned aluminum bar in slanted direction

Illumination direction	$\theta_0 = 0^\circ, \theta_1 = 20^\circ, 30^\circ, 40^\circ, 60^\circ$
Observation direction	$\theta_2 = 30^\circ, \theta_3 = 270^\circ$
Observation distance	$D = 150 \text{ mm}$

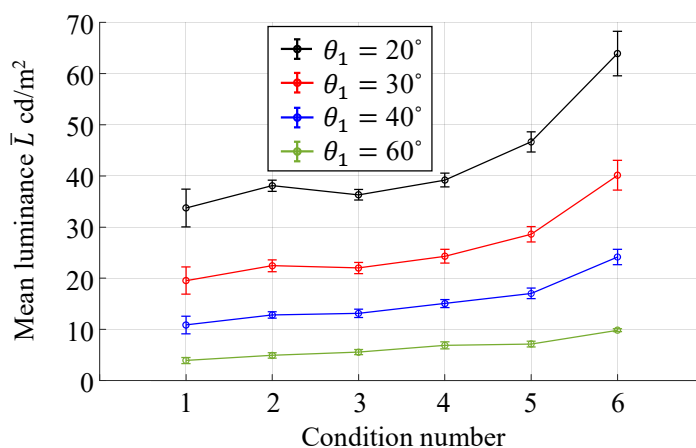


Fig. 4.15 Simulated mean luminance in observing the turned aluminum bar in slanted direction

4.3.3.3 写真撮影による検証

図 4.13, 4.15 に示した平均輝度の計算結果から, 旋削面の法線方向に対して様々な角度で斜めに照明光を入射させ, 旋削面の半径方向から観察した場合に, 外観の違いを明確に見出せると予想される. そこで検証のため, 図 4.16 に示すセットアップで加工面の写真を撮影した. 実験室の別の照明光の影響を除くために丸棒を覆いで囲い, 白色半透明の幕の外から LED 光源で加工面を照らすことにより, 旋削面の法線に対して斜めから照明光を当てた. 照明光の入射角度は様々であったが, 覆いの寸法から θ_1 の値は最小で約 30° であった. また, 図 4.14 に示した条件と同様に加工面の法線方向から周方向に傾いた角度で観察をするため, 旋削面上で覆いの黒色の天井が映り込んでいる部分を撮影した.

視覚シミュレーションで計算された平均輝度の傾向と比較するため, 写真データの R , G , B から 3.3.5 節で述べた式(3.13)~(3.15)により, XYZ 三刺激値のうち Y を計算し, Y の平均を求めた. これは 3.2.3 節で述べたように, Y が輝度に比例するためである.

図 4.17 に加工面の写真を示す. 初心者の官能評価で最も顕著な差が見られた条件 1, 6 を比較すると, 図 4.13, 4.15 に示した平均輝度の計算結果から予想されたように条件 6 の写真が比較的明るく見える.

図 4.18 に, 写真のデータから計算した平均の Y の値を示す. 条件 6 が最も高く条件 5 が 2 番目に高い点と, 条件 1~4 と比較して条件 6 の値が 10%以上高い点では, 図 4.13, 4.15 に示した平均輝度の計算結果と同じ傾向を示している. さらに, 図 4.15 の計算結果と同様に, 条件 6 の平均の Y の値は条件 1 の約 2 倍である. したがって, 視覚シミュレーションにより, 微視的な形状の差を原因とする輝度の変化を予測できたと言える.

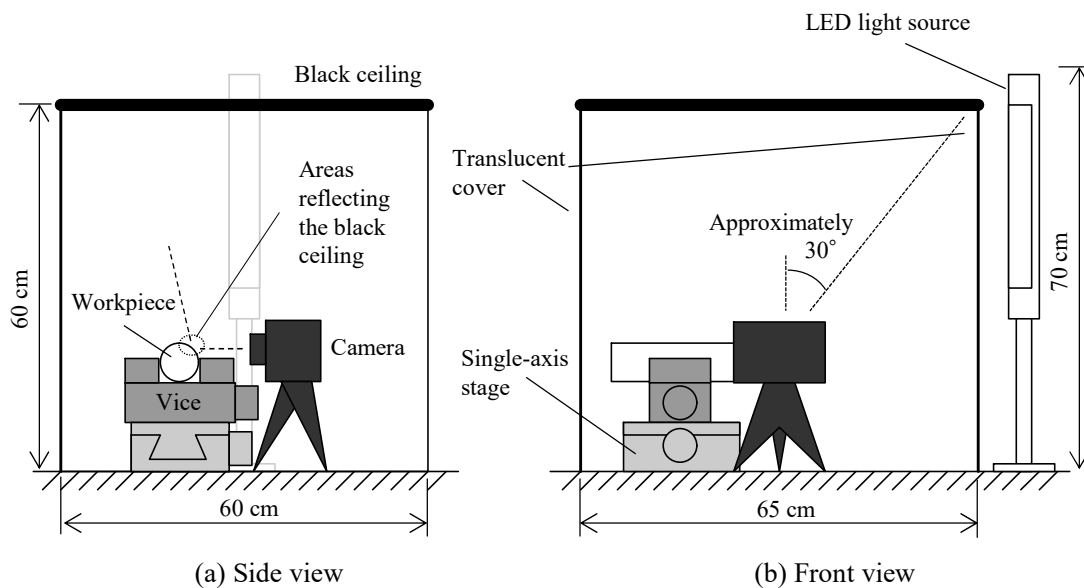


Fig. 4.16 Setup for taking photograph of the turned aluminum bar

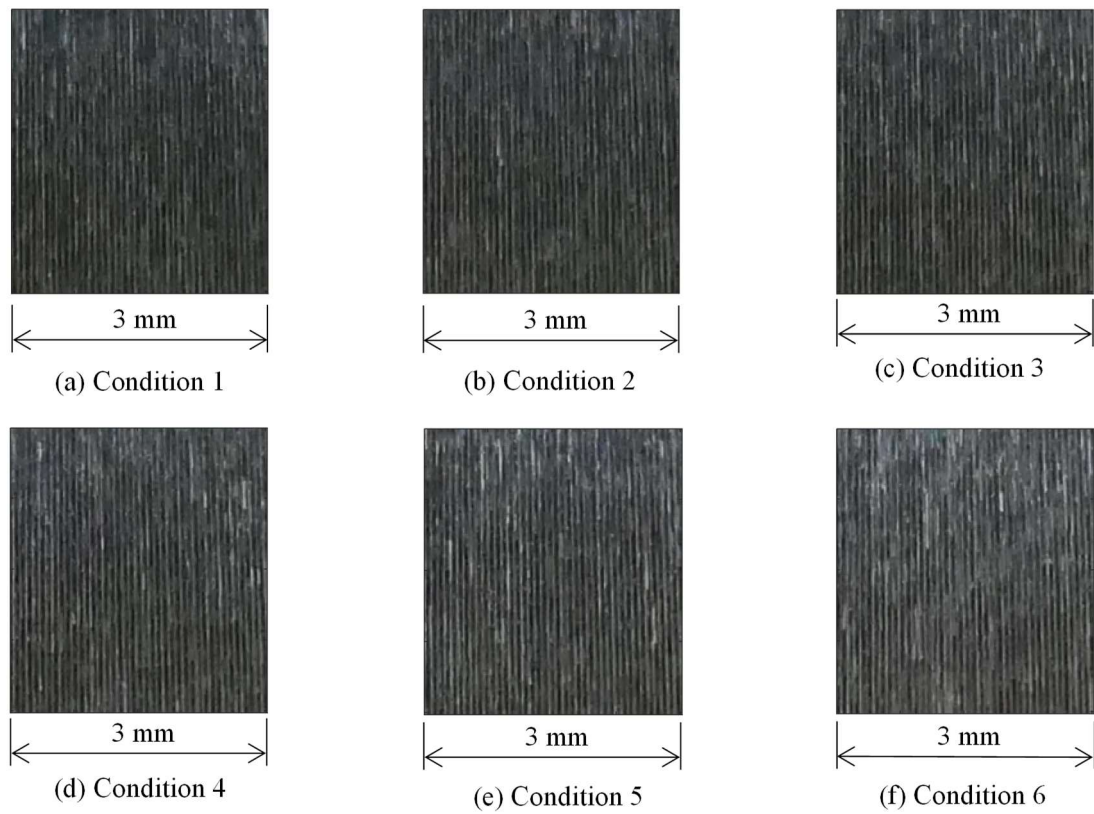


Fig. 4.17 Photograph of the turned aluminum bar

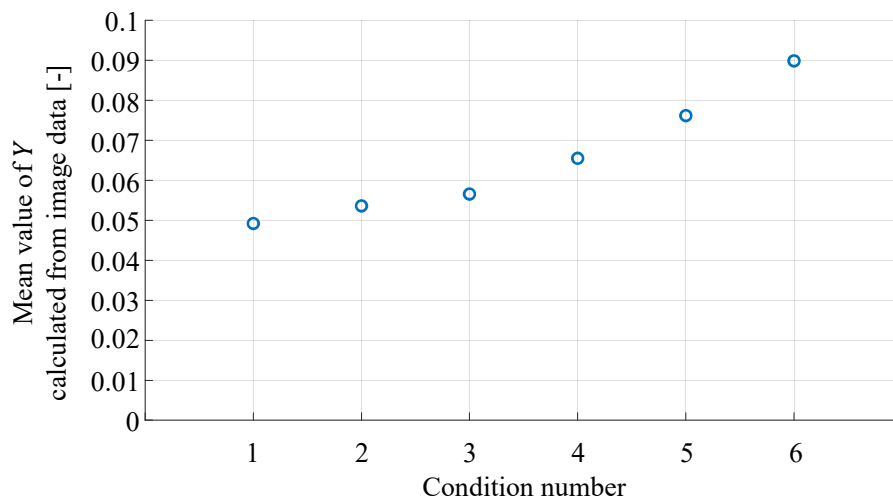


Fig. 4.18 Mean value of Y calculated from photograph data of the turned aluminum bar

4.3.4 光沢の度合いを変化させる加工面形状の特徴についての検討

図 4.12 に示した反射輝度分布曲線において輝度の差が生じた原因は、図 4.6 のレーザ顕微鏡画像にみられた微細な条痕の多少によって、反射光の強度が輝度対比弁別閾の 10% を超えて変化したためであると考えられる。加工面形状の特徴のうち、どのようなパラメータが主要な要因であるかについて検討する。

まずレーザ顕微鏡による観察画像では、図 4.7 に示した反射光の強度分布の計算結果と対応がみられた。反射光の強度 $\langle I_{\text{out}} \rangle$ は、式(3.55)に示したように $\text{tr}(\mathbf{M}_{i,j}^* \mathbf{M}_{i,j})$ に比例する。 $\mathbf{M}_{i,j}$ が式(3.56)により求められることを利用して $\text{tr}(\mathbf{M}_{i,j}^* \mathbf{M}_{i,j})$ の計算を整理すると次式のようなになる。

$$\text{tr}(\mathbf{M}_{i,j}^* \mathbf{M}_{i,j}) = \frac{(-v_x A_{i,j} - v_y B_{i,j} + v_z)^2}{(4\pi|\mathbf{D} - \mathbf{x}_{i,j}|)^2} \text{tr}(\mathbf{M}_R^* \mathbf{M}_R) \quad (4.3)$$

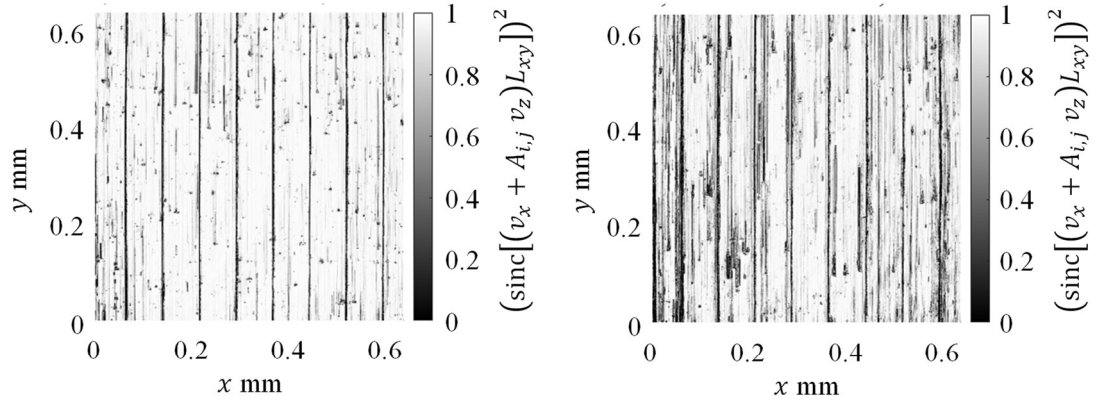
$$\times (2L_{xy})^4 (\text{sinc}[(v_x + A_{i,j}v_z)L_{xy}])^2 (\text{sinc}[(v_y + B_{i,j}v_z)L_{xy}])^2$$

ここで、 $A_{i,j}$ 、 $B_{i,j}$ はそれぞれ測定点 $\mathbf{x}_{i,j}$ での x 、 y 方向の勾配であり式(3.18)で計算される。 v_x 、 v_y 、 v_z はそれぞれ式(3.45)で定義した \mathbf{v} の x 、 y 、 z 成分であり、波数 $k = 2\pi/\lambda$ と照明光および観察の方向が含まれている。式(4.3)の右辺において、 $|\mathbf{D} - \mathbf{x}_{i,j}|$ の項については、観察距離 $|\mathbf{D}|$ が 150 mm であるのに対して $\mathbf{x}_{i,j}$ が数 μm のスケールと 1000 倍以上小さいため、反射光強度を 10%以上変化させる主要な要因であるとは考えられない。また \mathbf{M}_R は Fresnel 係数を含む行列であるが、旋削加工面の材質は一定であったため、同様に反射光の強度を変化させる主要な要因とは考えられない。さらに、加工面の真上から入射して真上に反射する光を考える場合、 $\mathbf{e}_1 = -\mathbf{e}_z$ 、 $\mathbf{e}_2 = \mathbf{e}_z$ であるから、 $\mathbf{v} = k(\mathbf{e}_1 - \mathbf{e}_2)$ の x 、 y 成分は 0 であり、 $(-v_x A_{i,j} - v_y B_{i,j} + v_z)^2$ の値は $A_{i,j}$ 、 $B_{i,j}$ にかかわらず一定である。そこで $(\text{sinc}[(v_x + A_{i,j}v_z)L_{xy}])^2$ 、 $(\text{sinc}[(v_y + B_{i,j}v_z)L_{xy}])^2$ に注目する。

図 4.7 に示した加工面 1、6 の形状データより $(\text{sinc}[(v_x + A_{i,j}v_z)L_{xy}])^2$ および $(\text{sinc}[(v_y + B_{i,j}v_z)L_{xy}])^2$ の分布を計算した。光の波長は、レーザ顕微鏡の測定条件に合わせて $\lambda = 405 \text{ nm}$ とした。図 4.19 に計算結果を示す。2 種類の分布を比較すると、図 4.6 のレーザ顕微鏡画像に見られた切削方向の微細な条痕に比較的好く対応するのは、(a1)(a2)に示した $(\text{sinc}[(v_x + A_{i,j}v_z)L_{xy}])^2$ である。レーザ顕微鏡画像や表面粗さ測定器の測定結果では、切削方向の微細な条痕の多少に差がみられ、切削方向を横断する方向である x 方向の断面形状に差があると予想された。 $A_{i,j}$ は x 方向の勾配であり、微細な条痕の多少によって特に $A_{i,j}$ の分布が変化することで、レーザ顕微鏡画像に見られた差が生じたと考えられる。

次に反射輝度分布曲線にみられた平均輝度の差について考える。まず

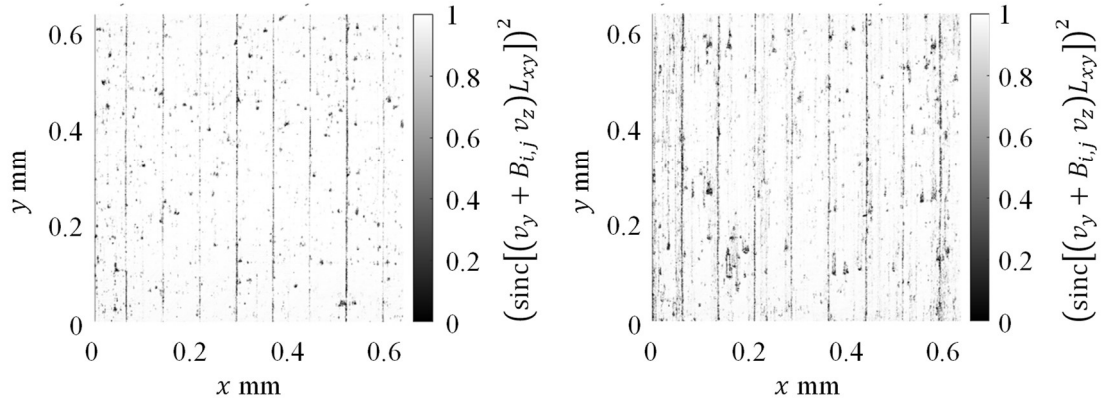
$(-v_x A_{i,j} - v_y B_{i,j} + v_z)^2$ については、 $-v_x A_{i,j} - v_y B_{i,j} + v_z$ が波数 k に比例するため、規格化した $[(-v_x A_{i,j} - v_y B_{i,j} + v_z)/k]^2$ の平均を W_1 とおき次式により計算する。



(a1) Condition 1 (‘Glossy’), area 1

(a2) Condition 6 (‘Cloudy’), area 1

(a) Distribution of $(\text{sinc}[(v_x + A_{i,j} v_z) L_{xy}])^2$



(b1) Condition 1 (‘Glossy’), area 1

(b2) Condition 6 (‘Cloudy’), area 1

(b) Distribution of $(\text{sinc}[(v_y + B_{i,j} v_z) L_{xy}])^2$

Fig. 4.19 Distributions of $(\text{sinc}[(v_x + A_{i,j} v_z) L_{xy}])^2$ and $(\text{sinc}[(v_y + B_{i,j} v_z) L_{xy}])^2$ calculated from measured surface shape data of conditions 1 and 6 of the turned aluminum bar when wavelength $\lambda = 405 \text{ nm}$

$$W_1 = \frac{1}{(\text{測定点の総数})} \sum_{i,j} \left[\frac{-v_x A_{i,j} - v_y B_{i,j} + v_z}{k} \right]^2 \quad (4.4)$$

最も顕著な差がみられた条件 1 と 6 について、それぞれ 3 箇所ずつ測定した形状データについて W_1 を計算した. 式(4.4)に示した計算式の右辺には、測定点での勾配 $A_{i,j}$, $B_{i,j}$ に加えて v/k の各成分が含まれているため、 W_1 は照明光と観察の方向に依存する. そこで計算条件として、表 4.4 に示した反射輝度分布曲線を描く際の視覚シミュレーション条件と同じ方向を用いた. 図 4.20 に計算結果を示す. 図中の○印は条件ごとの平均値を、エラーバーの長さは標準偏差をあらわす. 反射輝度分布曲線にみられたような、正反射の角度 20°

でピークをもつ傾向や、条件によって 10%を上回るような差はみられず、輝度や光沢の度合いを変化させる主要な要因とは考えられない。

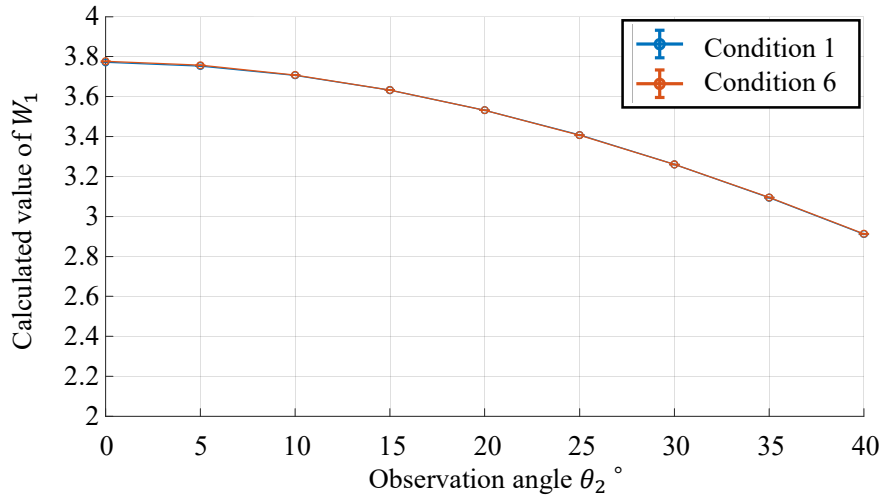


Fig. 4.20 Calculated values of W_1 of conditions 1 and 6 of the turned aluminum bar

さらに、条件 1~6 の形状データから $(\text{sinc}[(v_x + A_{i,j}v_z)L_{xy}])^2$ を計算し、各条件について 3 箇所 の測定位置で計算した値の平均を求めた。 $(\text{sinc}[(v_x + A_{i,j}v_z)L])^2$ の平均を W_x とおき、次式により計算した。

$$W_x = \frac{1}{(\text{測定点の総数})} \sum_{i,j} (\text{sinc}[(v_x + A_{i,j}v_z)L_{xy}])^2 \quad (4.5)$$

式(4.5)の右辺には、測定点での勾配 $A_{i,j}$, $B_{i,j}$ に加えて v の各成分が含まれている。したがって W_x は照明光と観察の方向、光の波長に依存する。方向については表 4.4 に示した反射輝度分布曲線の計算条件と同じ値とし、光の波長は $\lambda = 400, 550, 700 \text{ nm}$ の場合について計算した。

図 4.21 に W_x の計算結果を λ ごとに分けて示す。図中の○印は、それぞれの条件について 3 箇所 の測定位置に対して計算した値の平均をあらわし、エラーバーの長さは標準偏差をあらわす。いずれの λ の場合でも、特に正反射の角度に比較的近い $\theta_2 = 15^\circ, 20^\circ, 25^\circ$ では、条件 6 と条件 1~4 の差が標準偏差を超えており、条件により差がみられる。条件ごとの差は λ によって変化しており、同図(a)の $\lambda = 400 \text{ nm}$ の場合において $\theta_2 = 15^\circ, 20^\circ$ では、条件 6 と条件 1~4 の差は約 0.08 であり、条件 1~4 の W_x が 0.9 であることから輝度対比弁別閾の 10%程度の差がある。したがって、 W_x が光沢の度合いを変化させる主要な要因であると考えられる。また、光沢の度合いと光の波長、勾配の分布の間に関係があると考えられる。

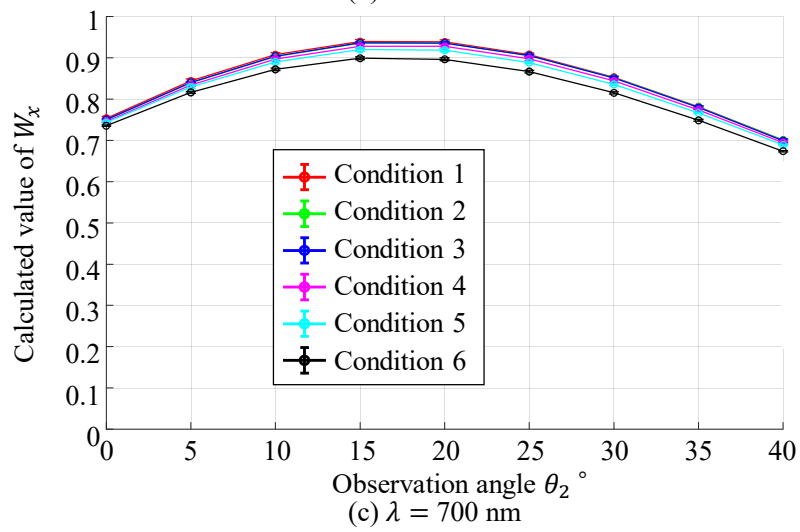
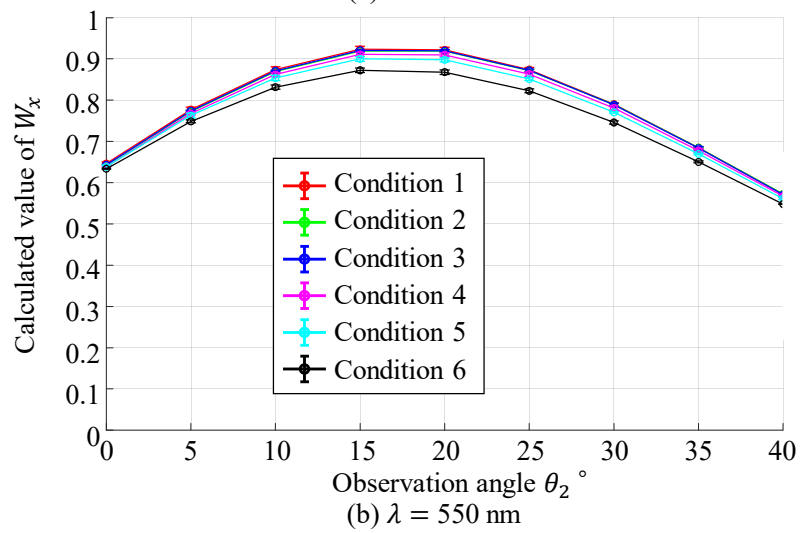
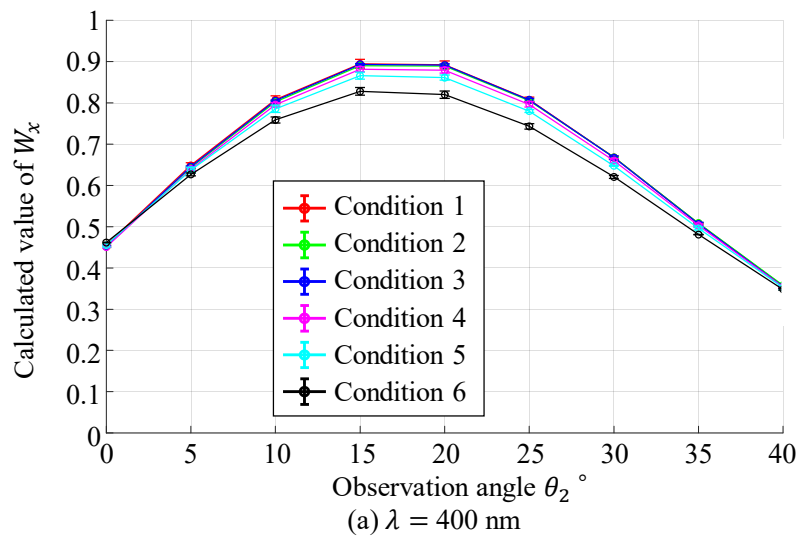


Fig. 4.21 Calculated values of W_x of the turned aluminum bar

4.4 ボールエンドミル加工面の光沢の度合いの解析

4.4.1 実験と調査の目的

異なる材質の工具を用いて切削をおこなったとき、工具の材料粒子の大きさや刃先形状の転写性が異なるために、加工面の微視的な形状が変化して光沢の度合いに差が生じることが予想される。ボールエンドミル加工において、このような差を視覚シミュレーションと反射輝度分布曲線を用いて解析できるかを検証するために切削実験と官能評価アンケート調査をおこなった。切削実験で得られた加工面の測定データから光沢の度合いを解析し、輝度の差を明確にできる観察角度を予測し、官能評価の結果と傾向が一致するかを検証した。

4.4.2 切削実験

本実験では異なる材質の工具を用いて同じ被削材を切削することで、微視的な形状を変化させて光沢の度合いの異なる2種類の加工面 A, B を用意した。図 4.22(a)に加工セットアップを、表 4.6 に加工条件を示す。コーテッド超硬合金ボールエンドミルを用いて切削した加工面が A、cBN (cubic Boron Nitride, 立方晶窒化ホウ素) ボールエンドミルを用いた加工面が B である。

本実験では加工面の微視的な形状の差に注目しているため、カスプ形状を統一する必要があった。そこで、ピックフィードと1刃あたりの送り量を同じとした。さらに、切削パターンが肉眼では見えない場合を扱うため、ピックフィードと1刃あたりの送り量を十分小さくする必要があった。Sato ら[61]によれば、観察距離が 250 mm の場合、カスプ形状の間隔が 0.25 mm より小さくなると肉眼では視認できない。4.4.5 節でおこなう官能評価では観察距離を 15 cm とするため、0.15 mm より小さい間隔をもつカスプ形状は視認できないと予想される。そこで、ピックフィードおよび1刃あたりの送り量が 0.05 mm となるように加工条件を決めた。図 4.22(b)に加工面の写真を示す。切削パターンが細かく視認することは難しい。

図 4.23 に加工面 A, B を光学顕微鏡で観察して得られた画像を示す。微視的な形状が異なることがわかる。原因としては、工具の刃先形状自体や被削材への転写性の違いが考えられる。

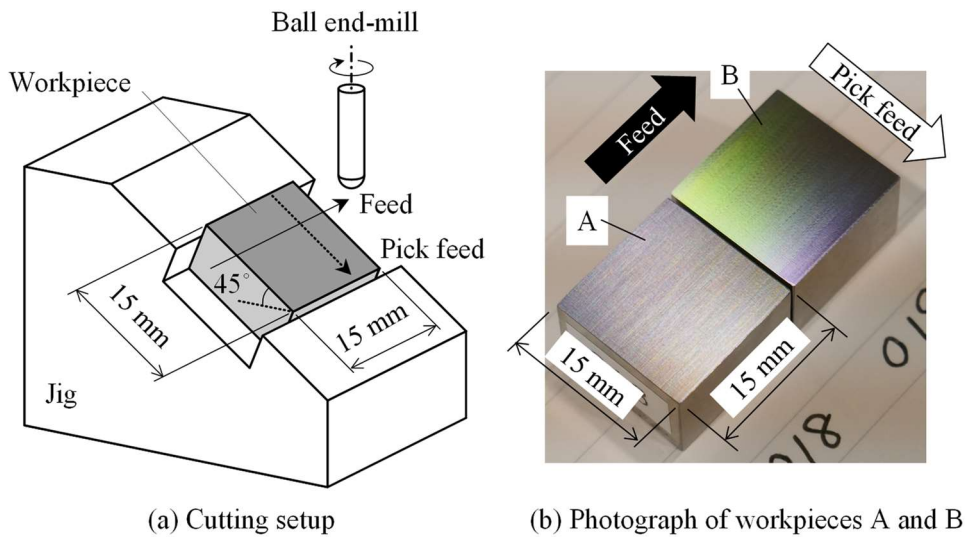


Fig. 4.22 Cutting setup and photograph of workpieces A and B

Table 4.6 Cutting conditions of workpieces A and B

Workpiece number	A	B
Workpiece material	STAVAX (52 HRC)	
Tool material	Coated cemented carbide	cBN
Tool	2-tooth ball end-mill, radius: 1 mm	
Rotation speed	11000 min ⁻¹	
Depth of cut	0.05 mm	0.1 mm
Pick feed	0.05 mm	
Feed rate	1100 mm/min	
Coolant	Oil mist	

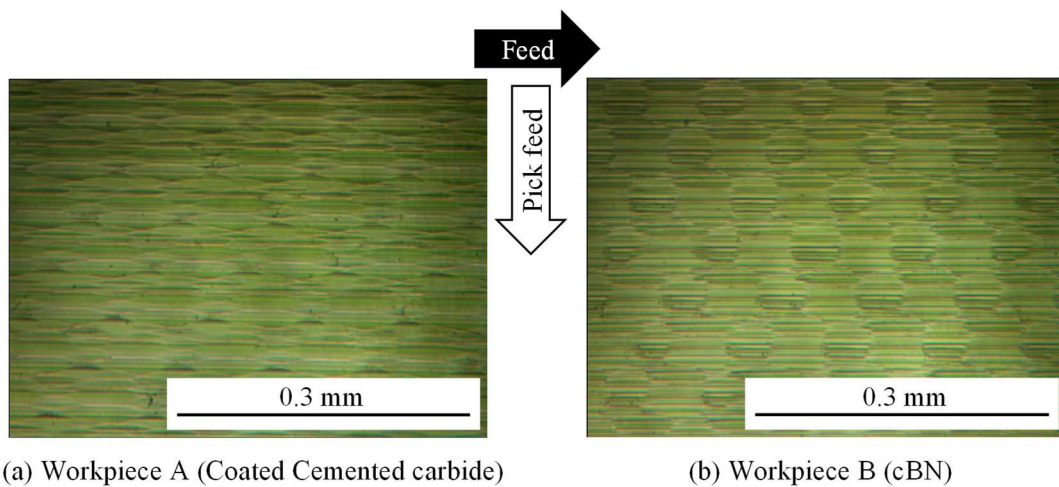


Fig. 4.23 Optical microscope image of workpieces A and B

4.4.3 形状と屈折率の測定

加工面 A, B の形状を、それぞれ 3 箇所ずつ白色干渉計で測定した。測定条件は表 2.4 と同様である。図 4.24 に得られた形状データを 1 箇所ずつ示す。加工面 A, B の表面粗さ Sa はそれぞれ $0.168 \pm 0.005 \mu\text{m}$, $0.166 \pm 0.007 \mu\text{m}$ であった。

図 4.24 に示した形状データについて、 $x = 0.15 \text{ mm}$ での断面形状を図 4.25 に示す。カスプ形状の幅は 0.05 mm 、理論カスプ高さは $0.3 \mu\text{m}$ であり図中より判別することは難しいが、高さのスケールは両方とも約 $2 \mu\text{m}$ であり、微視的な形状が異なることがわかる。

加工面の屈折率を分光エリプソメータ（入射角： 70° 、測定波長範囲： $300\sim 1000 \text{ nm}$ 、測定波長間隔： 5 nm ）を用いて測定した。図 4.26 に測定結果を示す。加工面 A, B の間で屈折率の実部 n 、消衰係数 κ の差は最大で約 0.1 であった。

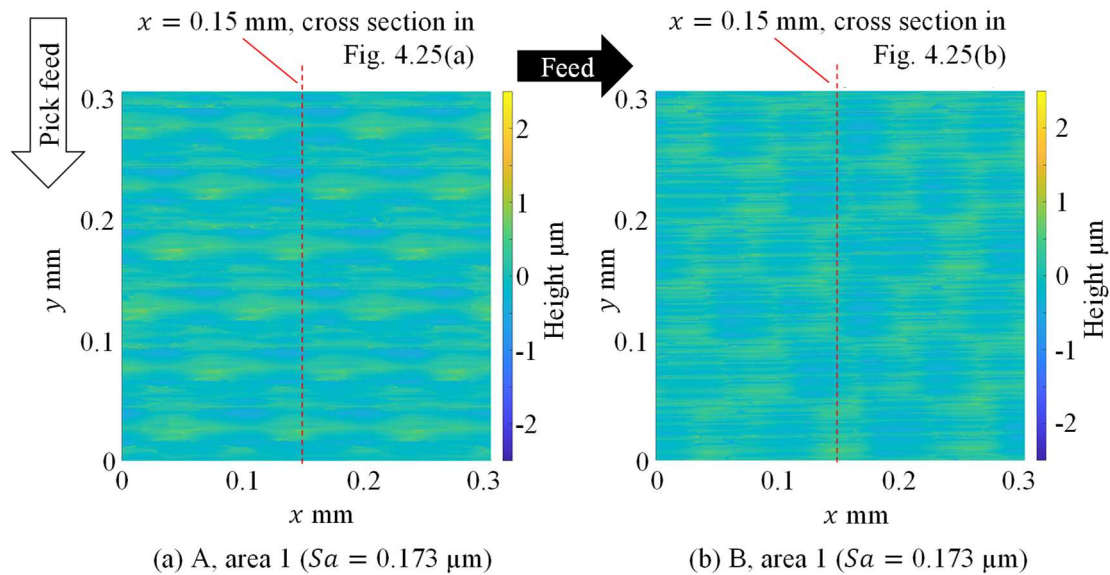


Fig. 4.24 Surface shape of workpieces A and B measured by white-light interferometer

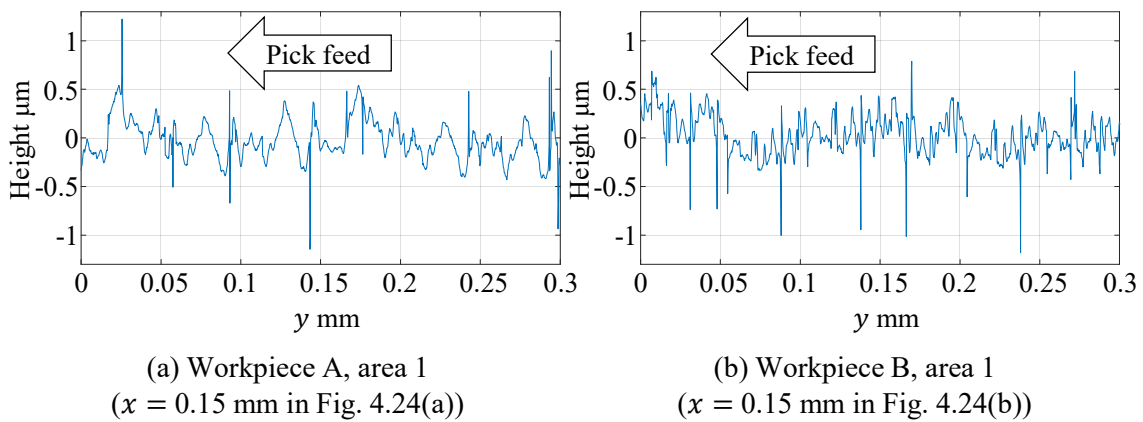


Fig. 4.25 Cross-sectional shape of workpieces A and B

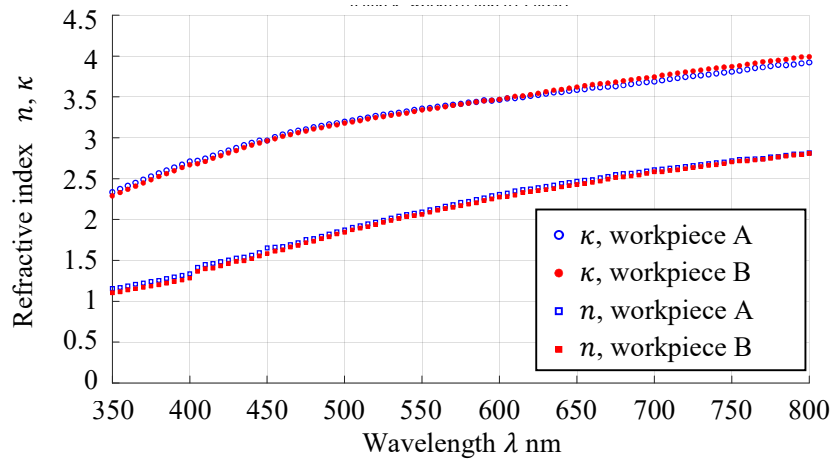


Fig. 4.26 Measured refractive index of workpieces A and B

4.4.4 視覚シミュレーションによる光沢の度合いの解析

まず図 4.24 に示した形状データに対して，光学顕微鏡と同様の照明光および観察条件で視覚シミュレーションをおこない，図 4.23 に示した観察画像と同様の反射光の強度分布が得られるかを調査した。

4.4.2 節の観察で用いた光学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とらえている．そこで 4.3.3.1 節で示した手順と同様に反射光の強度 $\langle I_{out} \rangle$ の分布を計算した．空間分解能は形状データと合わせ $2L_{xy} = 0.2 \mu\text{m}$ とし，光の波長は $\lambda = 555 \text{ nm}$ とした．図 4.27 に計算結果を示す．図 4.23 の光学顕微鏡画像とは，加工面上の位置は異なるものの対応がみられ，視覚シミュレーションにおいて微視的な形状の差を考慮できると予想される。

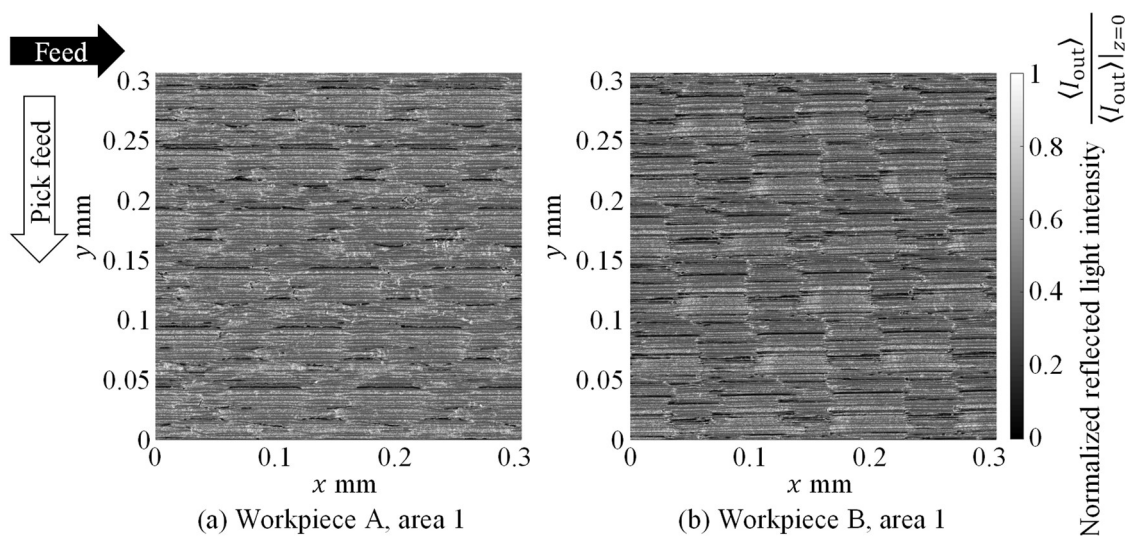


Fig. 4.27 Simulated distribution of normalized reflected light intensity $\langle I_{out} \rangle / \langle I_{out} \rangle|_{z=0}$ of workpieces A and B when wavelength $\lambda = 555 \text{ nm}$

次に、反射輝度分布曲線を描くことで光沢の度合いを解析した。

加工面の形状および屈折率の測定データは、それぞれ図 4.24, 図 4.26 に示したデータを用いた。照明光については、4.4.5 節の官能評価アンケート調査に用いる LED 平行光光源の照明光強度を、分光放射照度計（測定波長: 380~780 nm, 測定波長間隔: 1 nm）を用いて測定した。図 4.28 に測定結果を示す。

照明光および観察の方向については、官能評価アンケート調査のセットアップに合わせて、図 4.29 のように送り方向に垂直に照明光が入射し、観察する場合を考えた。表 4.7 に計算条件を示す。照明光の方向を固定し、観察角度を変化させた。

以上のデータを用いて、それぞれの観察角度 θ_2 について視覚シミュレーションをおこなない、加工面の輝度分布を計算し平均輝度 \bar{L} を求め反射輝度分布曲線を得た。図 4.30 に、計算で得られた輝度分布の例として $\theta_2 = 25^\circ, 45^\circ$ の場合を示す。同図(a1)(b1)に示した $\theta_2 = 25^\circ$ の場合では、加工面 A に比べて B の \bar{L} が高いのに対し、同図(a2)(b2)の $\theta_2 = 45^\circ$ の場合では A の方が高い。図 4.31 に反射輝度分布曲線の計算結果を示す。図中で○印は、それぞれの θ_2 において 3 箇所測定位置に対して計算した \bar{L} の平均、エラーバーの長さは標準偏差をあらわす。正反射方向の $\theta_2 = 45^\circ$ では加工面 A の \bar{L} が比較的高く、正反射の角度から離れた、 $\theta_2 \leq 30^\circ$ の範囲では加工面 B の \bar{L} が比較的高い。したがって、加工面 A は正反射方向での輝度が比較的高く、観察角度が変化するにつれて輝度が急峻に小さくなっている。よって、加工面 A の光沢の度合いが比較的高いと評価される。

なお、図 4.31 に示された輝度の差を人間が認識できるかについては、4.2.2 節に述べた通り、輝度の差が輝度対比弁別閾を超えているかに注目する。図 4.31 中において、例えば $\theta_2 = 25^\circ, 45^\circ$ での輝度の差は、いずれも加工面 A, B のどちらの値を基準としても 10%を超えている。したがって、これらの角度で観察すれば、輝度の差を明確に認識できると予想される。

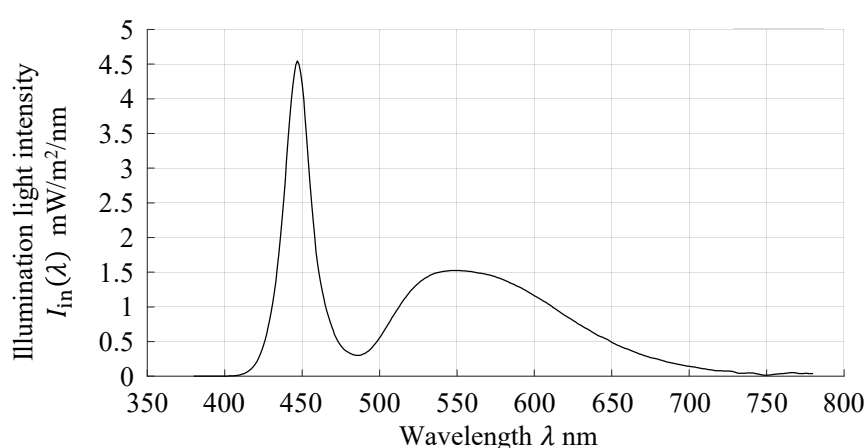


Fig. 4.28 Measured illumination light intensity $I_{in}(\lambda)$ of LED light source for workpieces A and B

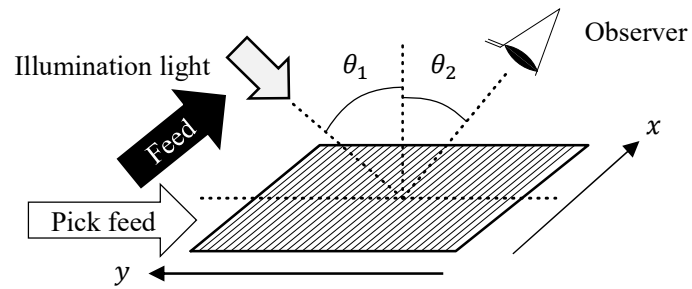


Fig. 4.29 Directions of illumination light and observation in visual simulation for angular luminance distribution of workpieces A and B

Table 4.7 Conditions of visual simulation for angular luminance distribution of workpieces A and B

Illumination direction	$\theta_0 = 90^\circ$
	$\theta_1 = 45^\circ$
Observation direction	$\theta_2 = 20^\circ, 23^\circ, 24^\circ, \dots, 27^\circ, 30^\circ, 35^\circ, 37^\circ, 38^\circ, \dots, 53^\circ, 55^\circ$
	$\theta_3 = 270^\circ$
Observation distance	$D = 150 \text{ mm}$

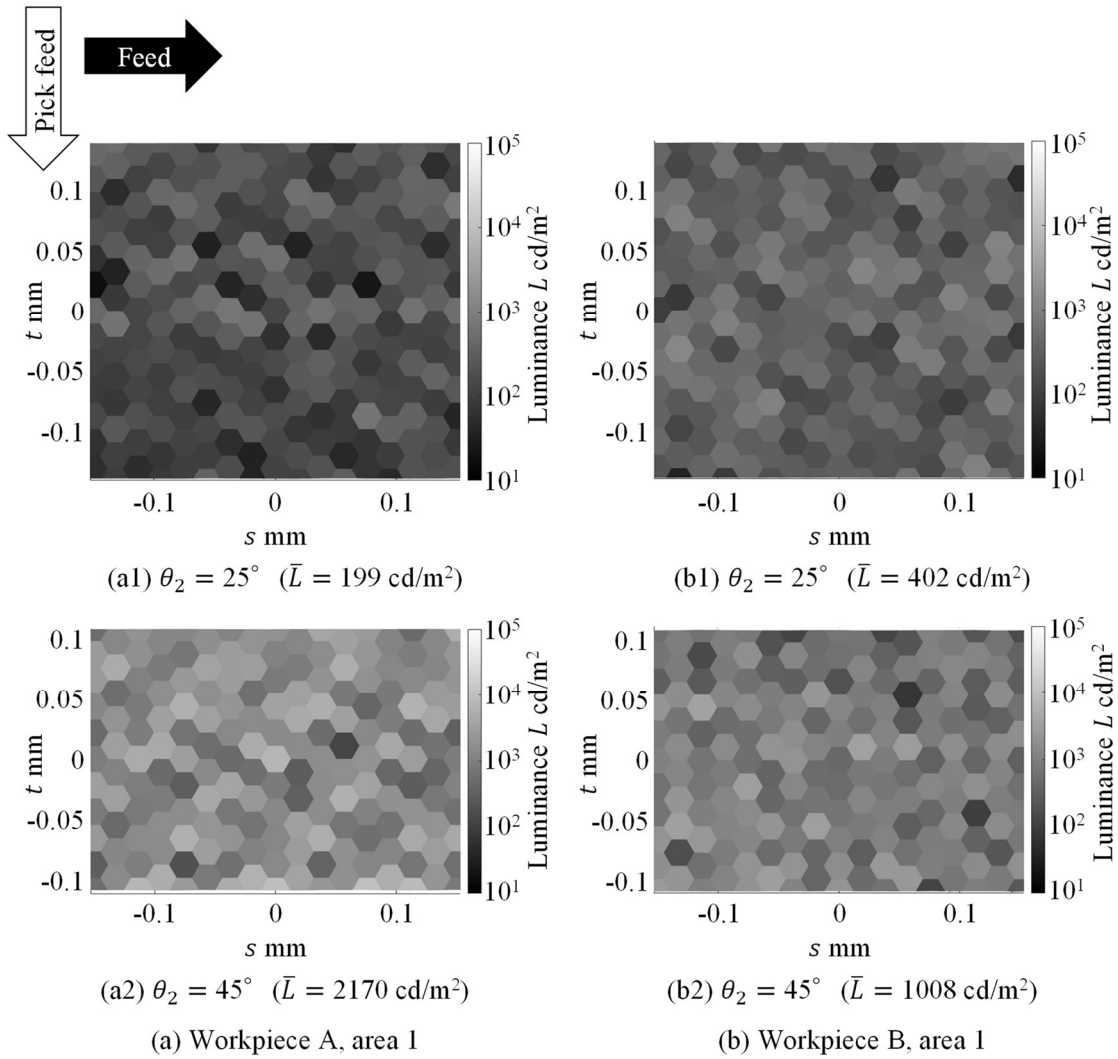


Fig. 4.30 Example of simulated luminance distribution of workpieces A and B

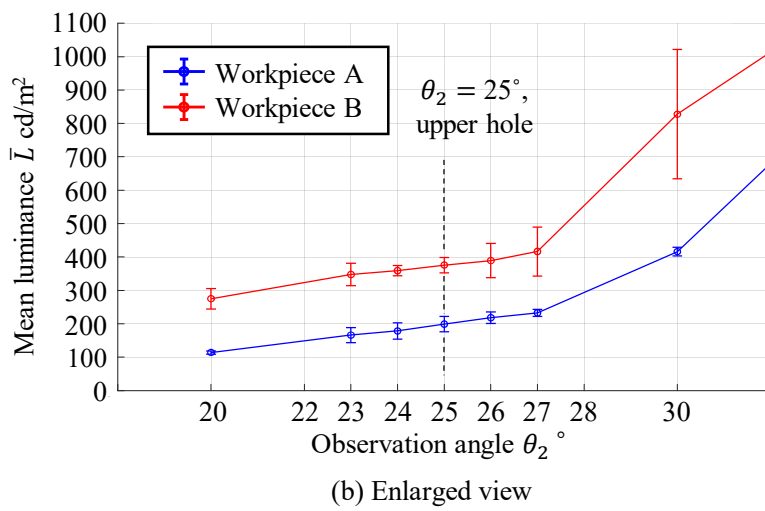
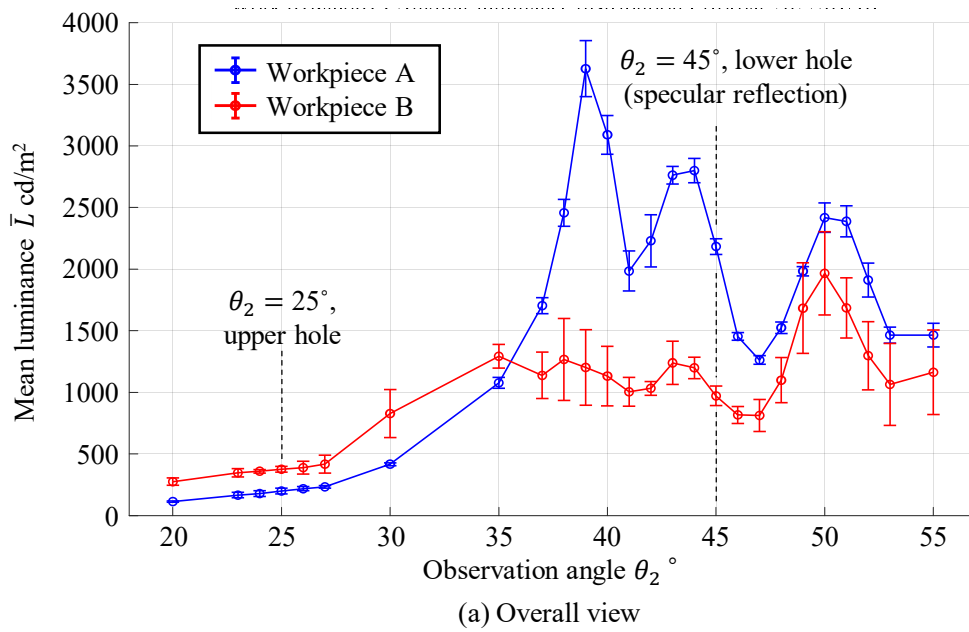


Fig. 4.31 Simulated angular luminance distribution of workpieces A and B

4.4.5 官能評価アンケート調査

図 4.31 に示された反射輝度分布曲線の計算結果が官能評価結果と一致するかを検証するため、官能評価アンケート調査をおこなった。評価者は機械工学を専攻する 20 代の学生 9 人とした。事前に光沢について簡単に説明した後、図 4.32 に示す 2 種類の観察セットアップで加工面を観察させた。最初に同図(a)のセットアップ 1、次に(b)のセットアップ 2 で観察させた。2つのセットアップでは共通して、45°に傾けた加工面を LED 平行光光源で照らし、加工面の周りを黒い布で覆うことで実験室の別の照明光の影響を除いた。加工面 A、B を紙面の手前側と奥側に並べて置き、評価者から見て左側が A、右側が B であった。セットアップ 1 では、加工面を自由な角度から観察させ、「どちらの加工面の光沢の度合いが強いかな」という質問に答えさせた。セットアップ 2 では、観察角度を統一するためについてを設け、上下 2 つの穴から観察させた。上の穴は正反射から 20°離れた $\theta_2 = 25^\circ$ の方向に、下の穴は正反射の $\theta_2 = 45^\circ$ の方向に開けた。2 つの穴から観察したときにそれぞれ「どちらの面が明るく見えるか」という質問に答えさせた。

表 4.8 に官能評価の結果を、図 4.31 に示した計算結果とともに示す。セットアップ 1 では、加工面 B の方が光沢の度合いが高いと答えた評価者が比較的多かった。その一方で、セットアップ 2 では、上の穴からの観察では加工面 A の方が明るく見えると答えた評価者が比較的多かった。下の穴からの観察では加工面 B の方が明るく見えると答えた評価者が比較的多かった。

4.4.6 官能評価結果と解析結果の比較

セットアップ 1 での官能評価では、加工面 B の方が光沢の度合いが高いと答えた評価者が比較的多かったが、計算結果では加工面 A の方が光沢の度合いが高い。セットアップ 1 で光沢の度合いを目視により評価するには、照明光の角度と加工面の傾きを把握した上で、正反射の方向、および正反射から離れた方向で加工面を観察する必要がある。しかしながら、観察角度の自由度が高かったため、評価者が必ずしもそういった観察をおこなわなかった可能性がある。図 4.31 に示した反射輝度分布曲線の計算結果では、 $\theta_2 \leq 35^\circ$ では加工面 B の方が輝度が高い。したがって、評価者が $\theta_2 \leq 35^\circ$ の方向で観察して加工面 B の方が明るく見えたために、加工面 B の光沢の度合いが比較的高いと評価した可能性が考えられる。

セットアップ 2 での官能評価では、上の穴 ($\theta_2 = 25^\circ$ の方向) では加工面 B の方が明るいと感じた評価者が多く、下の穴 ($\theta_2 = 45^\circ$ の方向) では加工面 A の方が明るいと感じた評価者が多かった。この傾向は、図 4.31 に示した反射輝度分布曲線の計算結果における平均輝度の大小関係と一致する。

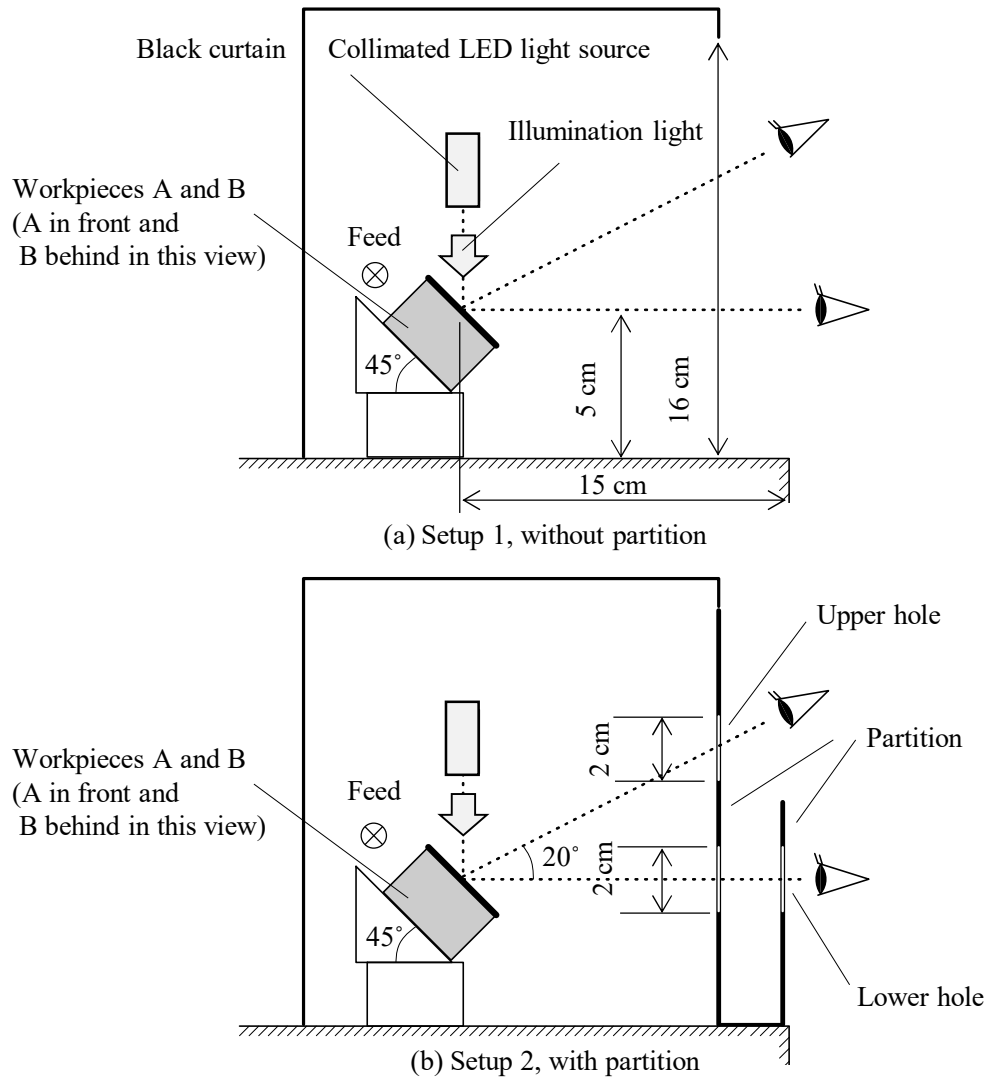


Fig. 4.32 Setup for sensory evaluation of workpieces A and B

Table 4.8 Result of sensory evaluation on gloss degree of workpieces A and B

	A	B	Higher mean luminance or gloss degree in simulated angular luminance distribution
Setup 1 “Which looks glossier?”	3	6	A
Setup 2 “Which looks brighter from upper hole?” ($\theta_2 = 25^\circ$)	1	8	B
Setup 2 “Which looks brighter from lower hole?” ($\theta_2 = 45^\circ$)	7	2	A

4.4.7 光沢の度合いが異なる原因についての検討

図 4.31 に示した反射輝度分布曲線の計算結果における輝度の差の原因として、屈折率の差と微視的な形状の差の 2 つの可能性について検討する。

屈折率については、図 4.26 に示した測定結果での違いは n , κ それぞれで最大約 0.1 であった。屈折率が輝度に与える影響を評価するには、Fresnel 係数およびエネルギー反射率を計算すればよいと考えられる。p 偏光, s 偏光に対する Fresnel 係数 R_p , R_s は、式(3.39)により求められる。

$n_0 = 1$, $\theta_{in} = 45^\circ$ として、それぞれの波長における Fresnel 係数を計算した。図 4.33 に、計算した Fresnel 係数の絶対値の 2 乗、すなわちエネルギー反射率を示す。エネルギー反射率の差は 2%未満であり、加工面 B の方が高い。したがって、屈折率のみの影響を考慮すると、輝度は加工面 B の方が最大で約 2%高くなると予想される。しかしながら、図 4.31 に示した反射輝度分布曲線の計算結果では 2 倍程度の差があり、さらに平均の輝度の大小関係が逆となっている観察角度もある。したがって、図 4.25 に示した微視的な形状の差が光沢の度合いの差の主な原因であると考えられる。

さらに微視的な形状の影響について定量的に調べるため、4.3.4 節と同様に、光沢の度合いを変化させる加工面形状のパラメータについて検討する。

まず W_1 の影響を調べる。 W_1 は式(4.4)において、 $\left[(-v_x A_{i,j} - v_y B_{i,j} + v_z)/k\right]^2$ の平均として定義している。加工面 A, B 上のそれぞれ 3 箇所ずつを測定した形状データに対して W_1 を計算した。 W_1 は照明光と観察の方向に依存するため、表 4.7 に示した反射輝度分布曲線を描いた際と同様の方向で計算した。図 4.34 に計算結果を示す。図中で○印は、3 箇所の測定位置に対して計算した値の平均をあらわし、エラーバーの長さは標準偏差をあらわす。加工面 A と B の差は 10%未満であり、輝度対比弁別閾のスケールの差はみられない。

次に $(\text{sinc}[(v_x + A_{i,j}v_z)L])^2$, $(\text{sinc}[(v_y + B_{i,j}v_z)L])^2$ の項について調べる。加工面 A, B の微視的な形状の差は、図 4.25 に示したように y 方向の断面形状にみられた。したがって、 y 方向の勾配 $B_{i,j}$ を含む $(\text{sinc}[(v_y + B_{i,j}v_z)L])^2$ に注目する。式(4.5)で定義した W_x と同様に、 W_y を次式により $(\text{sinc}[(v_y + B_{i,j}v_z)L])^2$ の平均として定義する。

$$W_y = \frac{1}{(\text{測定点の総数})} \sum_{i,j} (\text{sinc}[(v_y + B_{i,j}v_z)L_{xy}])^2 \quad (4.6)$$

式(4.6)の右辺には v の各成分が含まれているため、 W_y は光の波長 λ に依存する。そこで 4.3.4 節と同様に $\lambda = 400, 550, 700 \text{ nm}$ として計算した。図 4.35 に W_y の計算結果を示す。図中で○印は、3 箇所の測定位置に対して計算した値の平均をあらわし、エラーバーの長さは標準偏差をあらわす。いずれの波長においても正反射の角度 $\theta_2 = 45^\circ$ で最大となる傾向がみられ、加工面 A の値が B よりも大きく、その差が標準偏差を超えている。したがって、正反射方向の平均輝度の高低と対応していると言え、 W_y が加工面 A, B の

光沢の度合いを変化させたパラメータであると考えられる。また 4.3.4 節と同様に、波長によって W_y の差が変化する傾向がみられる。よって、光沢の度合いと光の波長、勾配の分布の間に関係があると考えられる。

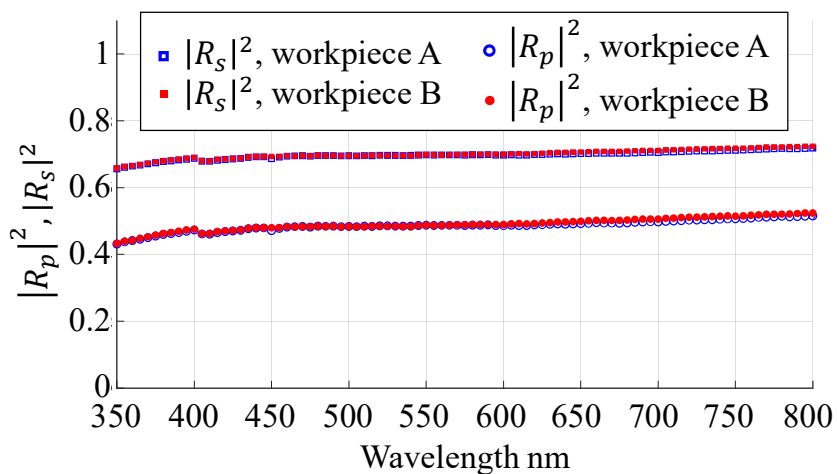


Fig. 4.33 Calculated energy reflection coefficient of workpieces A and B

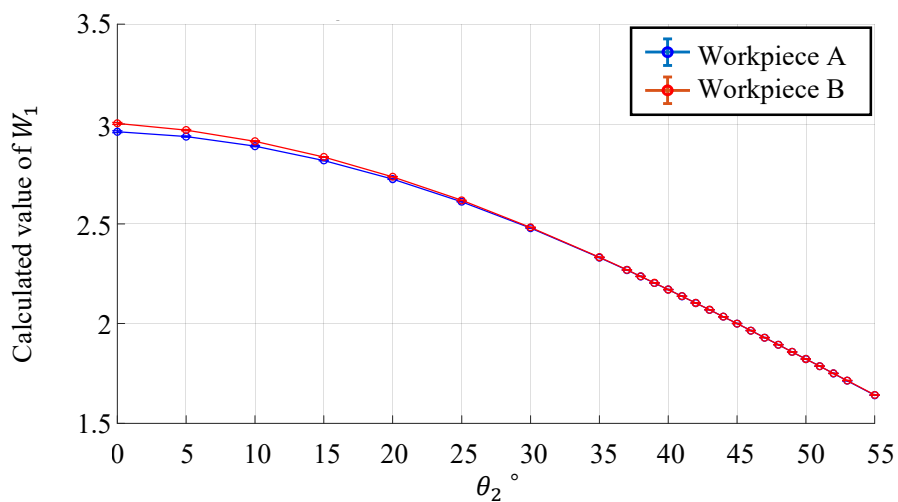
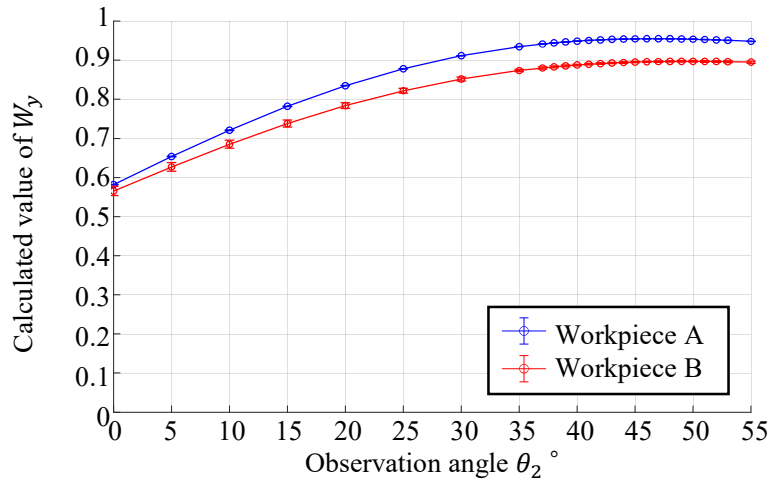
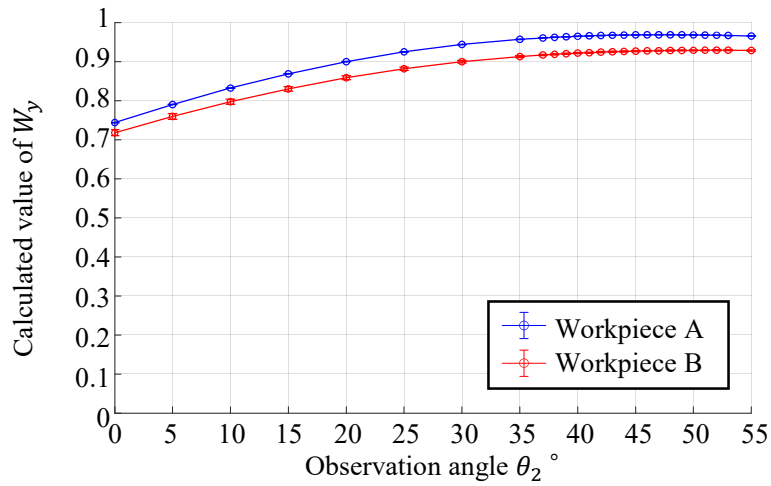


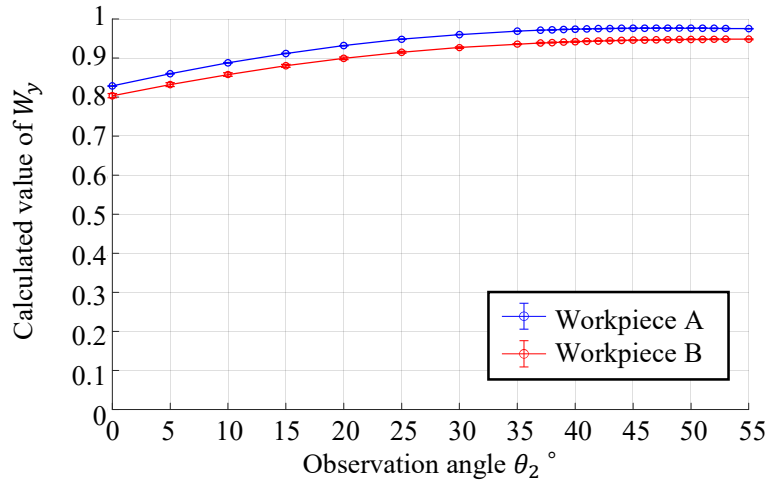
Fig. 4.34 Calculated values of W_1 of workpieces A and B



(a) $\lambda = 400 \text{ nm}$



(b) $\lambda = 550 \text{ nm}$



(c) $\lambda = 700 \text{ nm}$

Fig. 4.35 Calculated value of W_y of workpieces A and B

4.5 結論

切削加工面の光沢の度合いを反射輝度分布曲線により解析した。ケーススタディとして切削速度の異なるアルミニウム合金 A2017 旋削加工面と、異なる材質のボールエンドミルを用いて切削した加工面を扱った。

旋削加工面の解析から以下の結論が得られた。

- 1) 初心者の評価結果には、主に「きれいな光沢」と「白っぽい」の2種類があった。切削方向に沿った高さ $0.1 \mu\text{m}$ スケールの微細な条痕の多少によって光沢の度合いに差が生じたと考えられる。
- 2) 熟練者は「推奨条件」「切れてない」を判別したが、初心者には判別できなかった。
- 3) 初心者が「きれいな光沢」または「白っぽい」と評価した6個の条件の加工面について、加工面の形状から反射光の強度分布を計算したところ、微細な条痕の多少についてレーザー顕微鏡の観察画像と同様の傾向が見られた。
- 4) 視覚シミュレーションにより反射輝度分布曲線を描くことで光沢の度合いを解析した。その結果、初心者が異なる表現で評価した加工面の間には、輝度対比弁別閾を上回る輝度差があると計算された。
- 5) 視覚シミュレーションにより、外観の差を明確に見出せる撮影セットアップを予想した。輝度分布の計算結果と得られた写真データを比較した結果、最も顕著な差がみられた加工面の間で同様の傾向がみられた。
- 6) 加工面の勾配と光の波長、照明光・観察の角度から計算される W_x が光沢の度合いに対応している傾向が見られた。さらに、光の波長によって W_x が変化する傾向がみられた。

ボールエンドミル加工面の解析から以下の結論が得られた。

- 7) 超硬合金ボールエンドミルと cBN のボールエンドミルを用いて STAVAX を切削することで光沢の度合いの異なる加工面を用意し、反射輝度分布曲線を描くことで光沢の度合いを解析した。その結果、超硬合金工具を用いた加工面の光沢の度合いが比較的高いと評価された。

- 8) 計算結果の妥当性を検証するため官能評価をおこなった結果，加工面の輝度の差を明確に認識できると予想された観察セットアップでの官能評価結果と計算結果の傾向が一致した.
- 9) 光沢の度合いが異なる原因として，加工面の勾配の分布が考えられた. W_x と同様に定義した W_y が光沢の度合いに対応している傾向が見られた. さらに，光の波長によって W_y が変化する傾向がみられた.

以上から，視覚シミュレーションを用いて輝度分布を計算することで加工面のデータから光沢の度合いを定量的に説明し，外観の差を明確に見出だせる撮影または観察のセットアップを予測できると考えられる. さらに，加工面の勾配の分布と波長，および照明光と観察の方向から計算されるパラメータ W_x , W_y は，光沢の度合いに対応していると考えられる. さらに光沢の度合いと光の波長，加工面の勾配の分布には関係があることがわかった.

第5章 虹面の解析

5.1 緒論

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。このような切削加工面は虹面とよばれる。藤本[10]は旋削加工での虹面について調査し、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を明らかにした。加工面のカスプ形状が同じであっても微視的な形状の差により、鏡面や普通虹面、つや虹面、白虹面などと表現され、光沢の度合いや虹面の色に注目して様々に異なる評価がなされることを実験により明らかにした。また、旋削加工の送り運動の誤差が虹面の不均一さに与える影響を調査している[62]。さらに外観の差を、様々な反射方向での回折光の強度分布により定量的に評価している[63][62]。しかしながら、藤本らの評価手法では単一波長の照明光を用いており、実際の加工面の色を解析しているわけではない。本研究では虹面の色を計算することで、均一さと鮮やかさを解析することを試みる。

切削加工面に限らず、一般に表面に可視光の波長以下のスケールの微細な形状がある場合、たとえ物質自体に色がなくとも肉眼で観察したとき色が知覚されることがあり、このような色は構造色とよばれる[64]。代表的な例の1つとしてモルフォ蝶の翅の色があり、FDTD法により解析した研究例がある[65]。

本章では、ボールエンドミルで切削して得られる虹面に注目する。まず虹面の色の均一さの解析に視覚シミュレーションを適用できるかを調査する。2.4節での官能評価アンケート調査で述べた加工面のうち、「均一である」などの肯定的な評価を受けた加工面に視覚シミュレーションを適用し、虹面の色の移り変わりの傾向が画像と一致するか、また均一さを表現できるかを調査する。次に、異なる材質の工具で切削した加工面の虹面の色の鮮やかさの解析をおこなう。材質の異なる工具では、材料粒子の大きさや加工状態が異なるため、同じ材質の被削材を同じ加工条件で切削したときに、異なる微視的な形状をもった加工面が得られると予想される。このような微視的な形状の違いは、4.4節において光沢の度合いに影響することがわかっており、虹面の色にも影響すると予想される。そこで、材質の異なる工具で切削した加工面に視覚シミュレーションを適用し、虹面の色の鮮やかさを解析した。さらに、官能評価アンケートをおこない、解析結果の妥当性を検証した。

本章の構成は以下の通りである。5.2節では、虹面の色の均一さと鮮やかさを解析する手法について述べる。5.3節では、2.4節での官能評価アンケート調査において均一と評価された加工面に注目し、視覚シミュレーションを適用して色の均一さの解析を試みる。5.4節では、4.4節で述べた、異なる材質の工具で切削した加工面について、改めて虹面の色の鮮やかさを解析し、解析結果を官能評価アンケートにより検証する。5.5節は以上の内容をまとめた結論である。

5.2 虹面の色の均一さと鮮やかさの解析方法

虹面は観察角度によって色が移り変わるような面であるため、虹面に関する官能指標を解析するには色を計算すればよいと考えられる。

虹面が均一に見えるという評価は、加工面内の異なる位置が同様の色の分布をもっていることを意味していると考えられる。したがって、加工面の異なる位置の形状を測定し、それぞれの色の計算結果を比較することで虹面の色の均一さを解析できると考えられる。ここでは、色相（色合い）をあらわすパラメータ h を用いる。

虹面に見える、または見えないという評価は、様々な方向から加工面を観察したときに鮮やかな色が見えるか見えないかに注目していると考えられる。色の3要素のうち鮮やかさをあらわすパラメータは、3.2.3節で述べた彩度 C^* であり、 C^* が低い場合は白や灰色、黒色などのくすんだ色を、 C^* が高い場合は鮮やかな赤や青、緑などをあらわす。そこで、様々な方向で観察したときの加工面の色の彩度 C^* を調べることで、虹面の色の鮮やかさを解析できると考えられる。

視覚シミュレーション結果や画像から平均の彩度と色相を計算する方法を述べる。図5.1に示すように、まず得られた色の分布のそれぞれの画素での L^* 、 a^* 、 b^* を求め、 $L^*a^*b^*$ 色空間にプロットする。 L^* 、 a^* 、 b^* の平均 \bar{L}^* 、 \bar{a}^* 、 \bar{b}^* を計算し、 a^*b^* 平面内で点 (\bar{a}^*, \bar{b}^*) と原点との距離を平均の彩度 \bar{C}^* 、位相角度を平均の色相 \bar{h} とする。

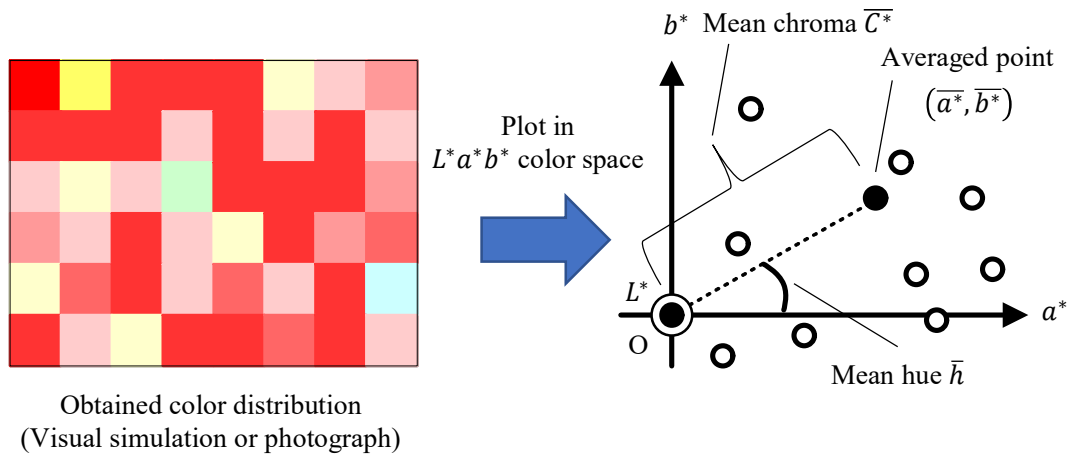


Fig. 5.1 Method to calculate mean chroma \bar{C}^* and mean hue \bar{h} of obtained color distribution

5.3 虹面の色の均一性の解析

5.3.1 目的

微視的な形状が均一である虹面は、面内の異なる部分でも同じ照明光・観察の条件で観察した場合に同じ色に見えると予想される。色は観察する方向によって変化するため、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視覚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。

5.3.2 加工面の測定と写真撮影および視覚シミュレーション

2.4 節で述べた官能評価アンケートの中で、「均一である」などの肯定的な判定を受けた加工面 10 番（送り速度：200 mm/min，ピックフィード：0.05 mm）に注目した。図 5.2 に加工面の写真を示す。

虹面の形状データを得るため、白色干渉計を用いて加工面形状を測定した。表 5.1 に測定条件を示す。虹面のうち、図 5.3 に示す 3 箇所（測定位置 1~3）を測定した。図 5.4 に測定位置 1 での形状の測定結果を示す。また、分光エリプソメータ（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 5.5 に屈折率の測定結果を示す。

図 5.6 に撮影セットアップを示す。LED 平行光光源を用いて加工面に照明光を当てた。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。照明光強度 $I_{in}(\lambda)$ 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 5.7 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。条件は写真撮影のセットアップに合わせ、表 5.2 に示すように設定した。

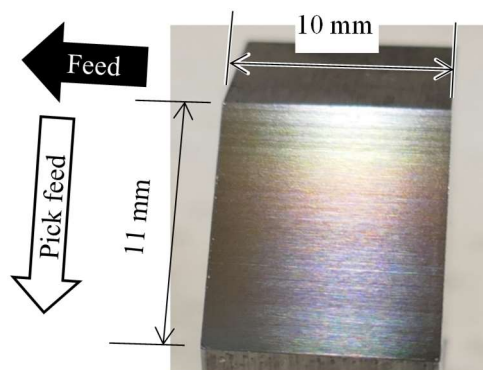


Fig. 5.2 Photograph of the iridescent sample (No. 10 in the sensory evaluation questionnaire)

Table 5.1 Measurement conditions of white-light interferometer for the iridescent sample

Measurement area size	1.5 mm × 1.5 mm
Measurement high resolution	0.01 nm
Spatial resolution $2L_{xy}$	1.1 μm

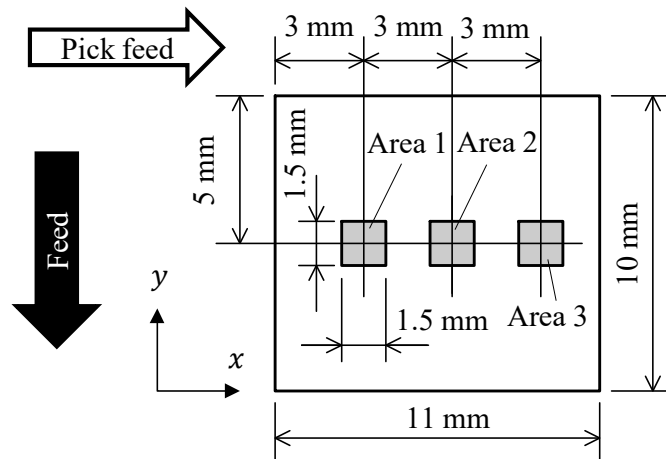


Fig. 5.3 Positions of measured area on iridescent sample

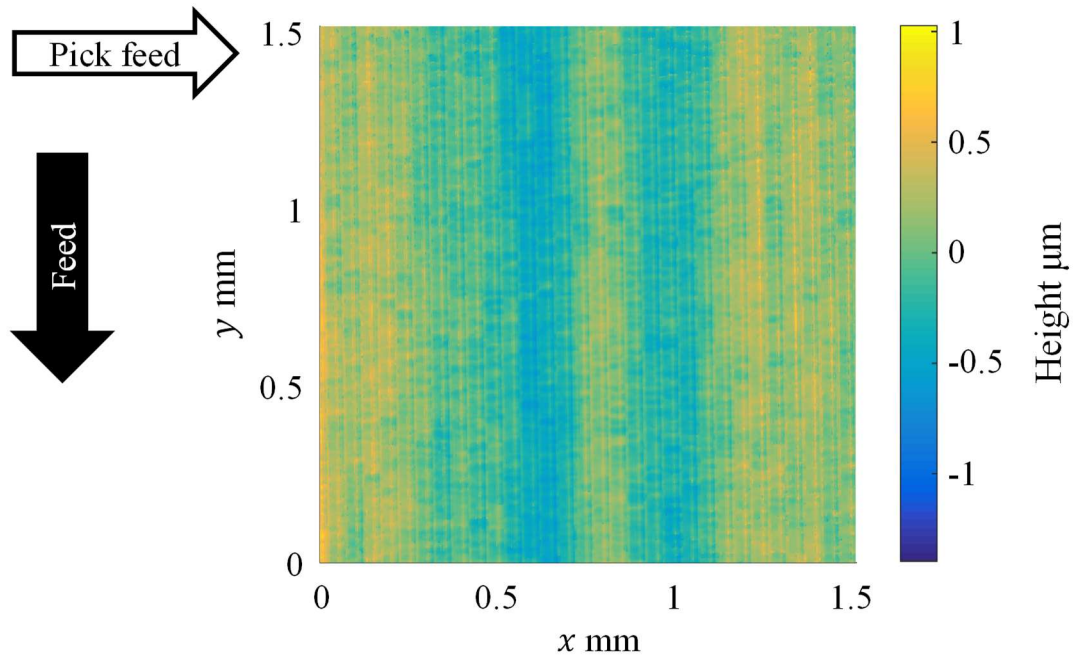


Fig. 5.4 Surface shape of area 1 of the iridescent sample measured by white-light interferometer

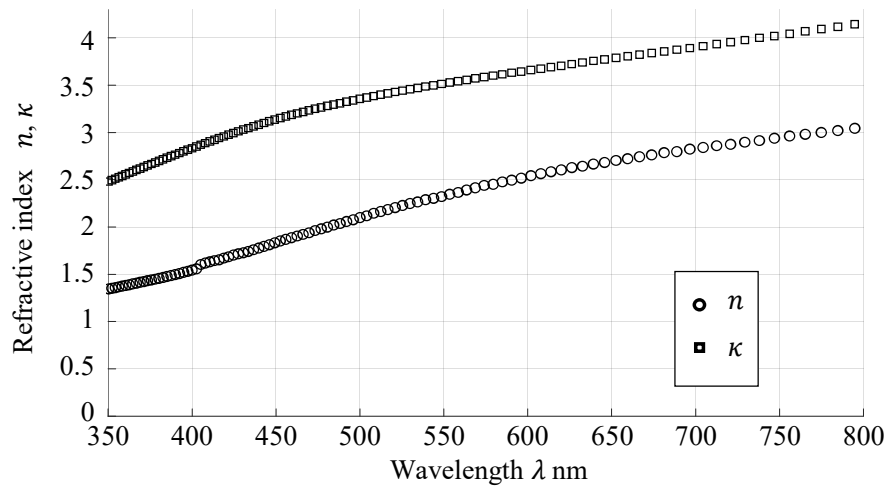


Fig. 5.5 Measured refractive index of the iridescent sample

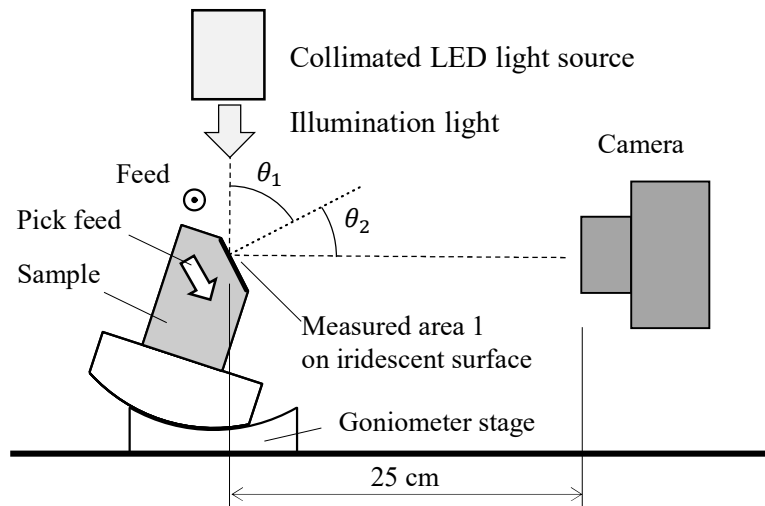


Fig. 5.6 Setup for taking photograph the iridescent sample

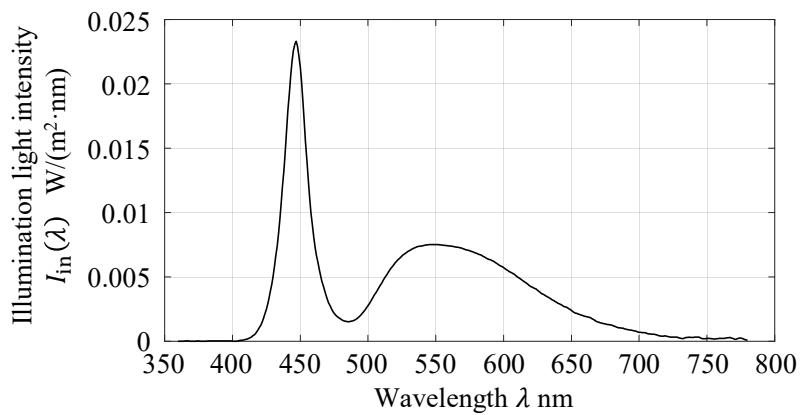


Fig. 5.7 Measured illumination light intensity $I_{in}(\lambda)$ of collimated LED light source for the iridescent sample

Table 5.2 Conditions of visual simulation for the iridescent sample

Spatial resolution $2L_{xy}$	1.1 μm
Wavelength λ	380 to 780 nm in interval of 5 nm
Illumination direction	$\theta_0 = 0^\circ$ $\theta_1 = 50^\circ, 49^\circ, 48^\circ, 47^\circ, \dots, 40^\circ$
Observation direction	$\theta_2 = 90^\circ - \theta_1$ ($\theta_2 = 40^\circ, 41^\circ, 42^\circ, 43^\circ, \dots, 50^\circ$) $\theta_3 = 0^\circ$
Observation distance	$D = 250$ mm

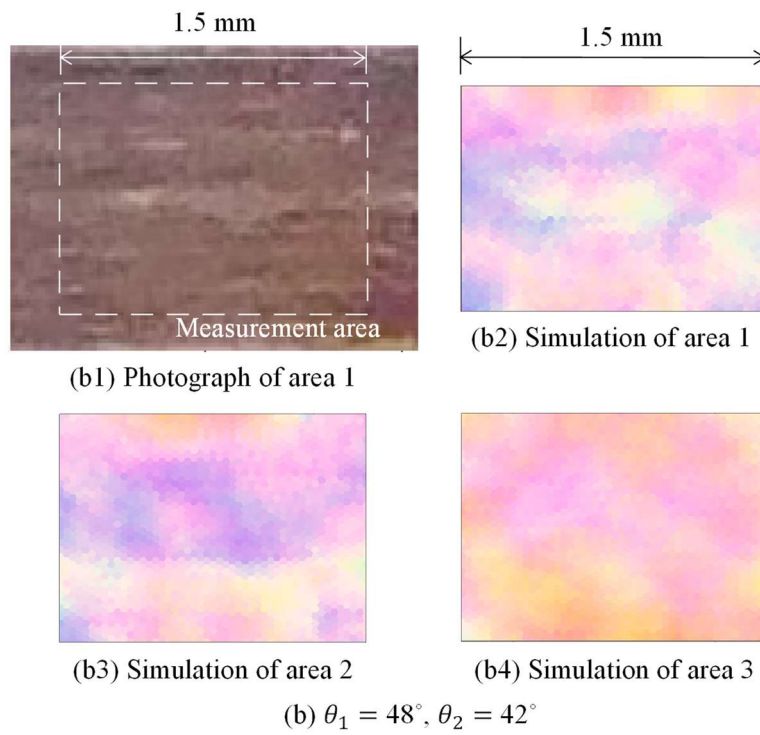
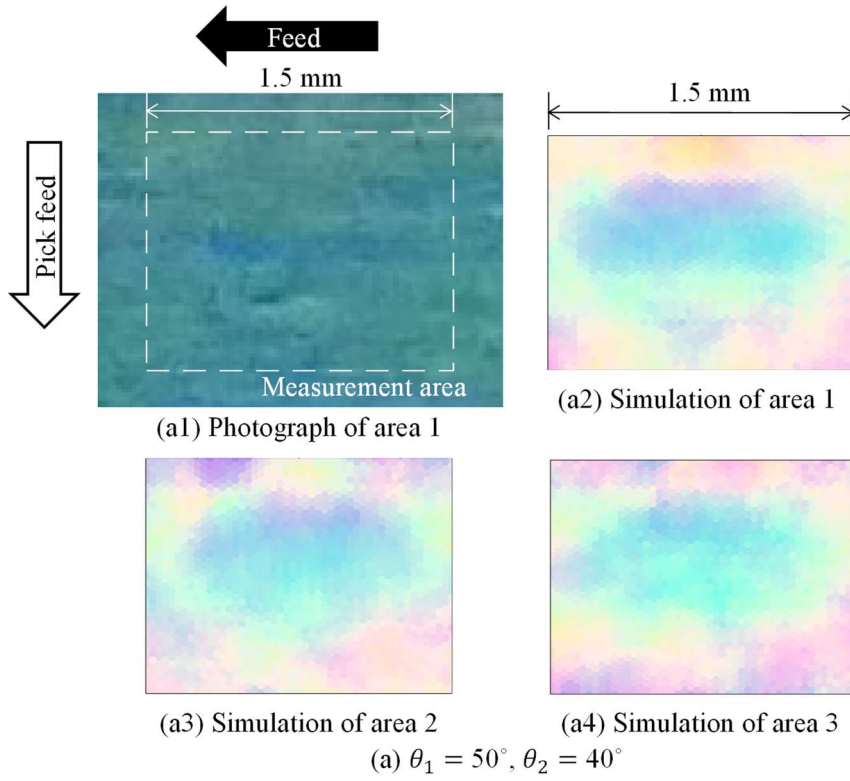
5.3.3 写真と視覚シミュレーション結果の比較

撮影で得られた写真から、形状を測定した範囲を抽出し、視覚シミュレーションにより計算された色の分布と比較した。

図 5.8 に、加工面の写真と色のシミュレーション結果の比較を示す。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、照明光と観察の角度が変化するとともに色が移り変わる傾向が一致している。さらに、それぞれの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。

写真およびシミュレーション結果の色を定量的に比較する。カメラでは分光放射輝度自体は測定できないため、分光放射輝度の絶対値に依存する L^* , a^* , b^* を比較することは困難である。そこで、写真データとシミュレーション結果それぞれについて、平均の色相 \bar{h} を計算し比較した。写真データでは、各画素について式(3.13)~(3.15)により R , G , B から三刺激値 X , Y , Z を計算し、 a^* , b^* を計算した。 a^* , b^* それぞれの平均 \bar{a}^* , \bar{b}^* を求め、 a^*b^* 平面における (\bar{a}^*, \bar{b}^*) の位相角度として平均の色相 \bar{h} を求めた。図 5.9 に $\theta_1 = 50^\circ$, $\theta_2 = 40^\circ$ として撮影した写真と R , G , B の分布、計算された a^* , b^* の分布の例を示す。 $\bar{a}^* = -26.3$, $\bar{b}^* = 2.2$ であるので、 $\bar{h} = \text{atan}(\bar{b}^*/\bar{a}^*) = 175^\circ$ となる。

シミュレーション結果については、計算の中で定めた画素それぞれについて a^* , b^* を計算し、写真と同様に平均の色相 \bar{h} を求めた。図 5.10 に、 $\theta_1 = 50^\circ$, $\theta_2 = 40^\circ$ の場合の色の分布と a^* , b^* の分布を示す。この場合は $\bar{a}^* = -49.0$, $\bar{b}^* = 48.8$ であるので、 $\bar{h} = \text{atan}(\bar{b}^*/\bar{a}^*) = 135^\circ$ となる。



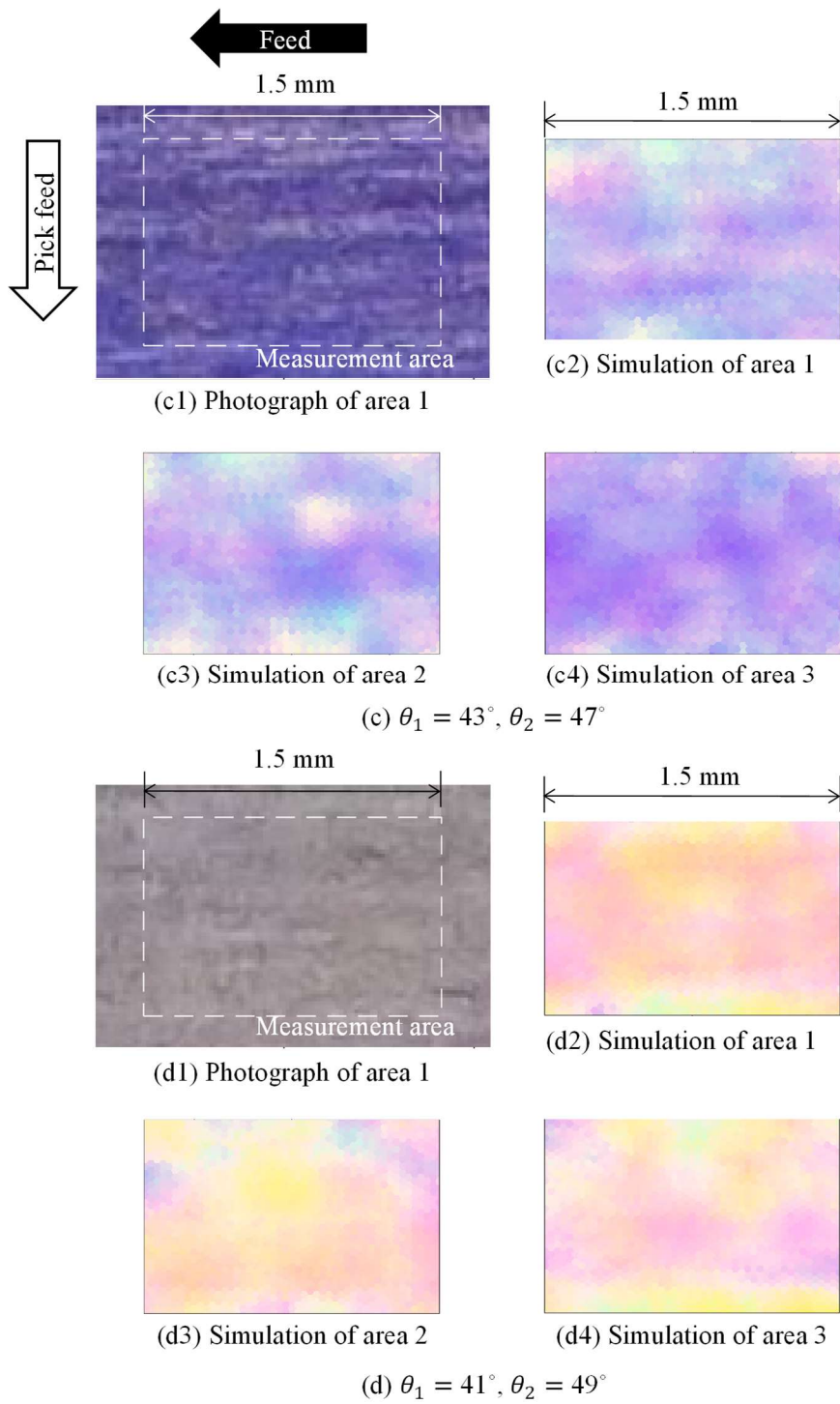


Fig. 5.8 Photograph and simulated color distribution of the iridescent sample

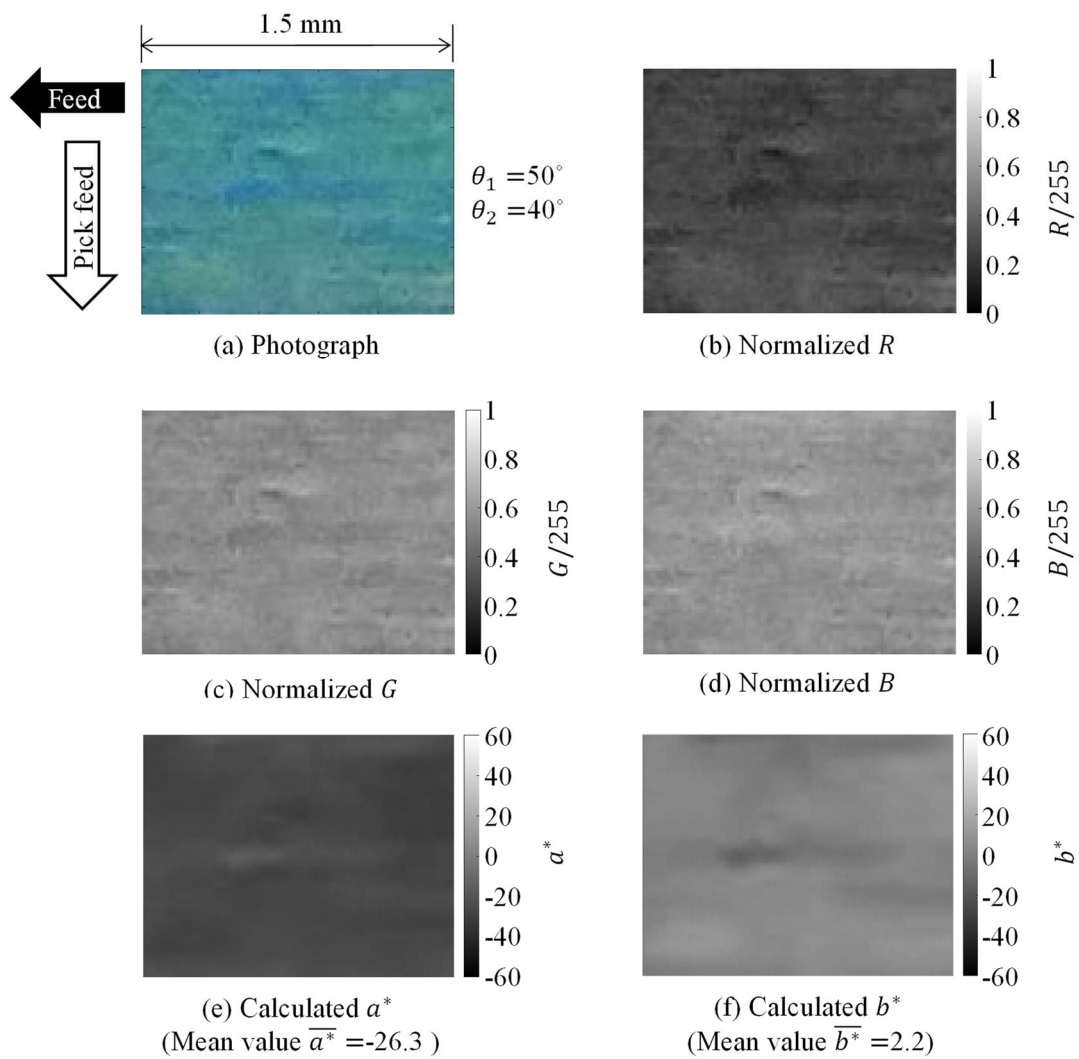


Fig. 5.9 Example of photograph of the iridescent sample, R , G , B distribution and calculated a^* , b^*

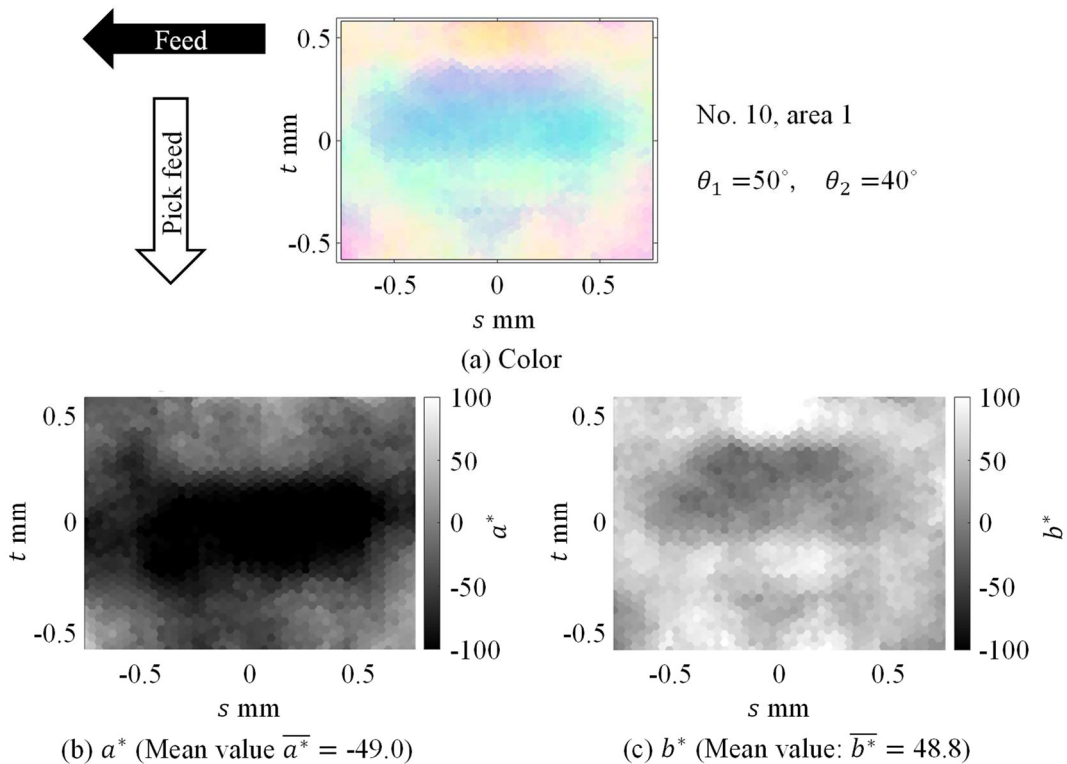


Fig. 5.10 Example of simulated distribution of color, a^* and b^* of the iridescent sample

図 5.11 に、写真データとシミュレーション結果について平均の色相 \bar{h} を計算した結果を示す。まず領域 1 での写真およびシミュレーション結果を比較すると、 \bar{h} が入射角 θ_1 によって変化する傾向が一致している。したがって、写真にみられる虹面の色の色相の変化を、視覚シミュレーションにより予測できると言える。

また、領域 1~3 のシミュレーション結果を比較すると、領域 1~3 の色相は同様に変化する傾向がみられる。測定位置 1~3 はピックフィード方向に異なる位置であり、広い面を写真に撮影すると図 5.2(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。ただし、特に $\theta_1 = 44^\circ, 47^\circ$ では領域 3 と領域 1, 2 との色相の差が約 180° であり、 a^*b^* 平面上で原点に対して反対の色であることを示している。すなわち、領域 1, 2 に比べ領域 3 の色が異なって見えると考えられる。虹面が均一、または不均一と判断される場合の色相の差の閾値については、さらに他の虹面について同様の解析をおこなって調査する必要がある。

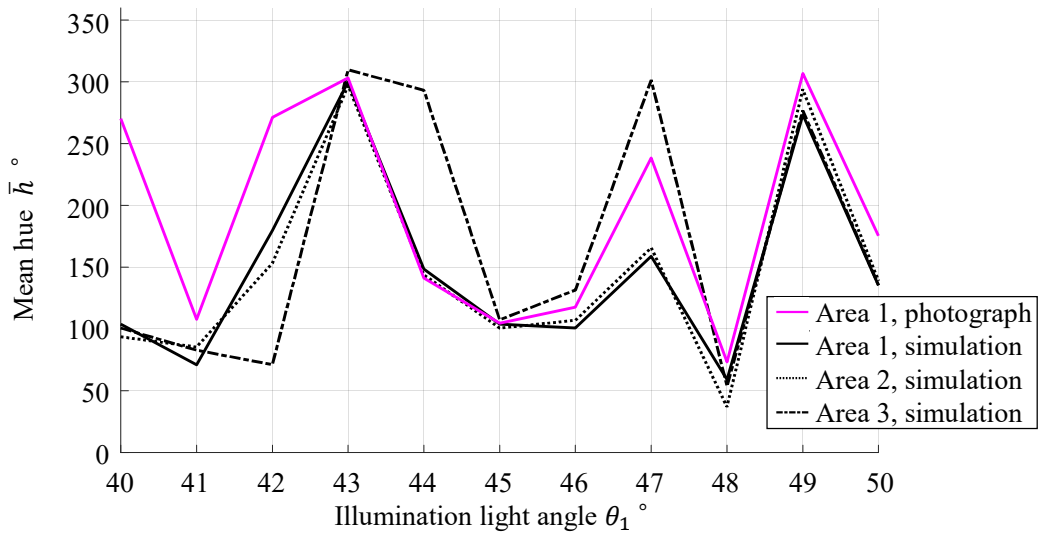


Fig. 5.11 Comparison of mean hue \bar{h} of photograph and simulation results of the uniform iridescent sample

5.4 虹面の色の鮮やかさの解析

5.4.1 目的と方法

「虹面が鮮やかに見える」「虹面に見えない」といった官能評価がなされることがある。これは、赤や緑といった色が鮮やかであるかを判定していると考えられる。そこで虹面の鮮やかさを、虹面の色の彩度を計算することにより解析することを試みる。4.4節で述べた、異なる材質のボールエンドミルで切削した加工面について、様々な観察角度での平均の彩度 \bar{C}^* を計算し比較した。計算結果の妥当性を調べるため、4.4節と同様に官能評価アンケートをおこなった。

5.4.2 彩度の計算結果

4.4節で述べた加工面 A, B について、反射輝度分布曲線を描いた時と同じ条件で視覚シミュレーションをおこない、それぞれの観察角度ごとに平均の彩度 \bar{C}^* を計算しプロットした。図 5.12 に加工面 A について $\theta_2 = 25^\circ$ としたときの計算結果の例を示す。同図(a)に色を示しており、(b)(c)はそれぞれ a^* , b^* の分布である。 a^* の平均 $\bar{a}^* = -4.5$ と b^* の平均 $\bar{b}^* = -17.9$ から、平均の彩度は $\bar{C}^* = \sqrt{\bar{a}^{*2} + \bar{b}^{*2}} = 18.5$ と計算される。図 5.13 に \bar{C}^* の計算結果を示す。図中で○印は、加工面 A, B でそれぞれ 3箇所ずつ測定した形状データに対して計算した値の平均をあらわし、エラーバーの長さは標準偏差をあらわす。計算した観察角度の中での彩度の最大値を比較すると、 $\theta_2 = 30^\circ$ での加工面 B の彩度が最も高い。また、 $\theta_2 \leq 35^\circ$ の範囲での平均を比較すると加工面 B の方が高い。 $\theta_2 > 35^\circ$ の範囲では 1° ごと

に彩度の大小関係が反転している。したがって、 $\theta_2 \leq 35^\circ$ の範囲での平均的な色の鮮やかさは加工面 B の方が高いが、 $\theta_2 > 35^\circ$ の範囲では観察角度によって変化すると評価される。

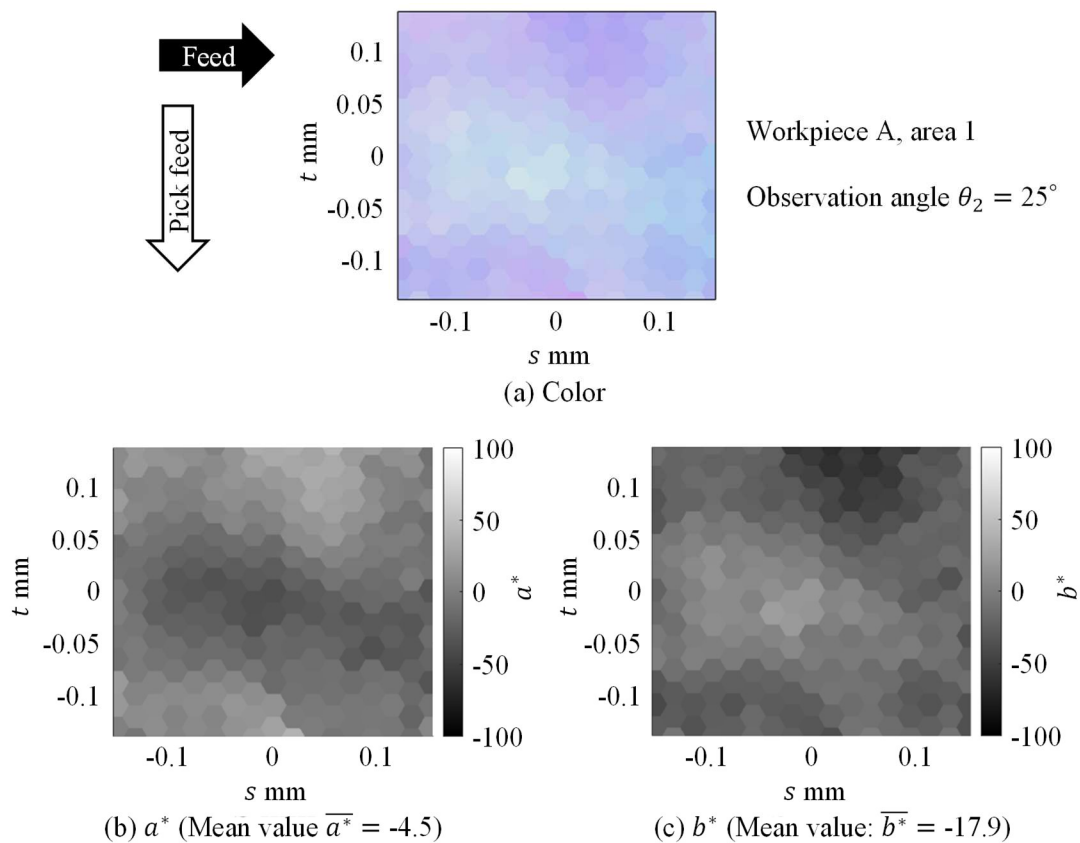


Fig. 5.12 Example of simulated distribution of color and chromaticity a^* and b^* of workpiece A

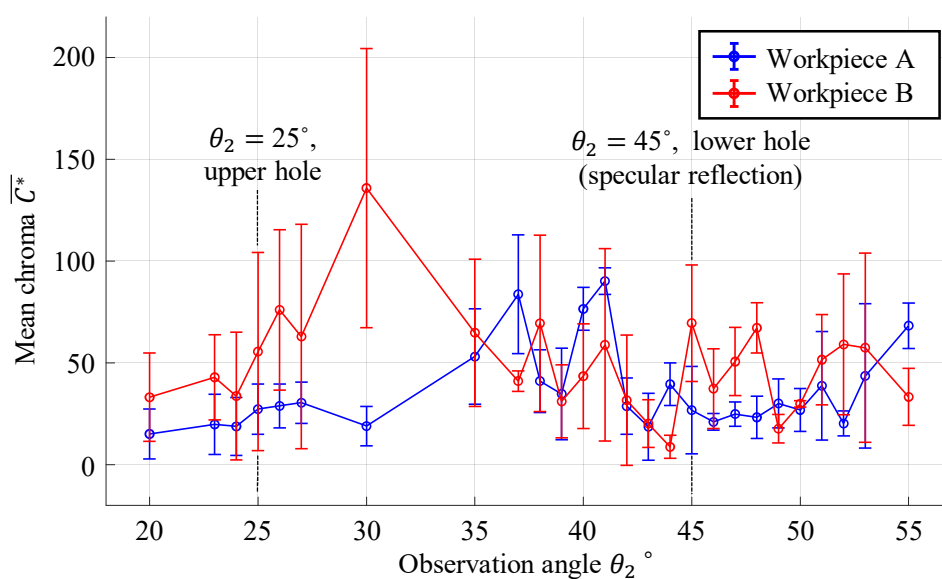


Fig. 5.13 Simulated mean chroma \bar{C}^* of workpieces A and B

5.4.3 官能評価アンケート調査と解析結果との比較

図 5.13 に示された彩度の計算結果が実際の官能評価結果と一致するかを検証するため、4.4.5 節で述べたものと同じセットアップで官能評価アンケート調査をおこなった。評価者に、事前に表色系や色の鮮やかさについて簡単に説明した後、図 4.32 に示したセットアップ 1, 2 で「どちらの面の色が鮮やかに見えるか」という質問に答えさせた。

表 5.3 に官能評価結果を、図 5.13 に示した平均の彩度の計算結果とともに示す。観察角度を制限しないセットアップ 1 では、全員が図 5.13 で得られた結果と同様の回答であった。観察角度を制限したセットアップ 2 については、 $\theta_2 = 25^\circ$ では全員が計算結果と同じ回答であり、 $\theta_2 = 45^\circ$ では計算結果と反対の評価をした評価者の方が多かった。

図 5.13 に示した平均の彩度の計算結果では、 $\theta_2 = 25^\circ$ の前後の角度では彩度の大小関係は反転していない一方で、 $\theta_2 = 45^\circ$ の前後 5° 程度では 1° 変化するごとに彩度の大小関係が反転している。セットアップ 2 では観察距離が 15 cm であったのに対し、ついたての穴の縦の長さは約 2 cm であり、観察角度 θ_2 には $7^\circ\sim 8^\circ$ のばらつきがあったと考えられる。例えば $\theta_2 = 41^\circ, 44^\circ$ では加工面 A の彩度の方が高く、これらの角度で評価者が観察した可能性がある。

以上から、様々な方向で観察したときの全体的な色の鮮やかさの傾向は説明できると言える。また特定の方向で観察したときの鮮やかさについては、前後の角度で頻繁に彩度の大小関係が反転しないような方向については説明できるが、観察角度によって頻繁に彩度の大小関係が変化すると計算される場合は困難であると考えられる。

Table 5.3 Result of sensory evaluation on iridescence of workpieces A and B

	A	B	Larger mean chroma \bar{C}^* calculated by visual simulation
Setup 1 “Which chroma of color looks larger?”	0	9	B
Setup 2 “Which chroma of color looks larger from upper hole?” ($\theta_2 = 25^\circ$)	0	9	B
Setup 2 “Which chroma of color looks larger from lower hole?” ($\theta_2 = 45^\circ$)	7	2	B

5.5 結論

ボールエンドミルで切削した虹面の色を視覚シミュレーションにより計算し、均一さと鮮やかさを説明することを試みた。本章で得られた結論は以下の通りである。

- 1) 虹面の色の变化について、虹面の写真と視覚シミュレーションによる色の計算結果を比較した結果、照明光と観察の方向によって色相が変化する傾向が一致した。したがって、視覚シミュレーションにより虹面の色の色相の変化を予測できると言える。
- 2) 虹面の均一さについて、官能評価アンケート調査において「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、加工面の異なる位置で測定した形状データで計算した結果、同様の色相の変化がみられた。したがって、視覚シミュレーションを用いて色相を計算することにより虹面の色の均一さを説明できると考えられる。虹面が均一、または不均一と判断される場合の色相の差の閾値については、さらに他の虹面について同様の解析をおこなって調査する必要がある。
- 3) 虹面の鮮やかさについて、反射輝度分布曲線と同様に、様々な方向で観察した場合の色の彩度を計算し観察角度に対してプロットすることで解析した。その結果、観察角度を限定しない場合の官能評価結果とは傾向が一致したが、特定の観察角度での結果とは一致しない場合があった。したがって、様々な方向で観察したときの全体的な色の鮮やかさの傾向は説明できると言える。また特定の方向で観察したときの鮮やかさについては、観察角度によって頻繁に彩度の大小関係が変化しないような場合は説明できるが、頻繁に大小関係が変化する場合には困難であると考えられる。

第6章 切削模様の均一さの解析

6.1 緒論

加工中に振動などの影響で工具の運動軌跡に幾何的な誤差が生じた場合、カスプ形状が巨視的に変化して切削模様に不均一さが生じることはよく知られている。例えばびびり振動が生じた時にはびびり模様と呼ばれる特徴的な模様が加工面にあらわれる[14]。また、振動などの問題は無くとも、仕上げ加工の効率向上や意匠性の観点から、切削模様を制御する研究がおこなわれている。斎藤らはボールエンドミル加工において、工具の偏心量[66]や加工パス[67]によって切削模様が変わることを明らかにし、加工パスを調整することで任意の切削模様を形成する手法を開発している。このような切削模様の評価は形状測定や写真撮影、顕微鏡での観察によりおこなわれることが多いが、官能指標として解析する方法は明らかでない。また、カスプ形状の巨視的な変化が切削模様に与える影響に関する研究例は見られるが、微視的な形状が切削模様に与える影響を明らかにした報告はみられない。

本章では、ボールエンドミル加工面の切削模様の均一さおよび不均一さを解析する。カスプ形状の巨視的な差、または微視的な差が原因となって、切削模様が均一に、または不均一に見える加工面の差を定量的に説明することを試みる。

一般に画像データにおける模様を解析する代表的な方法として2次元フーリエ変換[68]がある。2次元フーリエ変換では、対象とした領域全体の空間周波数および方向を計算するため、局所的な変化を検出することには適していないと予想される。模様の均一さや不均一さを解析する方法としては、ガボール変換やウェーブレット変換[69]、フラクタル解析[70]などが挙げられる。特にガボール変換は、ガボールフィルタを用いた信号処理の手法であり、画像処理の分野では、画像データの局所ごとの特徴量を解析する方法として、例えば顔認証技術[71]や医療分野における画像診断技術[72]などに広く使われている。3.2.1節で述べたように、V1では単純型細胞と複雑型細胞が視野内の至る領域での模様の空間周波数および傾きを検出しており、Andersonら[73]は特に単純型細胞の検出機能をガボール変換としてモデル化し、複数の測定手法により空間周波数と受容野の面積の関係を明らかにしている。Andersonらの測定結果を元にガボール変換を用いることで、官能評価における切削模様の均一さを解析できると予想される。本研究では、均一に、または不均一に見える切削模様をもつ加工面に対して、2次元フーリエ変換による輝度の空間的コントラストの計算とガボール変換による解析をおこない、両者の結果を比較する。

本章の構成は以下の通りである。6.2節では切削模様の均一さの解析手法を述べる。2次元フーリエ変換を応用して輝度の空間的コントラストを計算し、空間的コントラスト感度関数を用いて切削模様が視認できるかを調べる方法と、ガボール変換を用いて切削模様の均一さを解析する方法を述べる。6.3節では、切削模様の均一さに差が見られる加工面を得るためにおこなった加工実験について述べる。6.4節では、用意した3種類の加工面の形状を測定し解析をおこなう。視覚シミュレーションにより輝度分布を計算し、均一さと不均一

さの傾向が見られるかを、2次元フーリエ変換とガボール変換を用いてそれぞれの加工面について解析し比較する。6.5節は以上をまとめた結論である。

6.2 切削模様の解析方法

6.2.1 2次元フーリエ変換による輝度の空間的コントラストの計算

図 6.1 に示すような輝度の正弦波の縞模様を考える。位置 x における輝度 $L(x)$ は次式によってあらわされる。

$$L(x) = \bar{L} + a \sin(2\pi fx) \quad (6.1)$$

ここで \bar{L} は平均の輝度、 a は振幅、 f は空間周波数をあらわす。

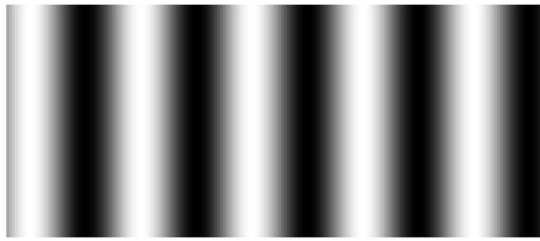
式(6.1)であらわされる模様が縞模様として知覚されるか、あるいは一様な輝度で模様の無い面として知覚されるかは、振幅 a と空間周波数 f に依存する。輝度の空間的コントラスト感度は、輝度の正弦波模様の空間周波数と振幅が様々に変化したとき、それぞれの空間周波数に対して正弦波模様を識別できる最小の輝度の振幅を示すものである[34]。図 6.2 は a と f を様々に変化させたときの縞模様を模式的に示したものである。図中で上から下に向かって a は大きくなり縞模様が見えやすくなる。また、左から右に向かって f は大きくなるが、 f が中くらいの値で縞模様が比較的明確に見えることがわかる。ここで、空間的コントラスト C を

$$C = \frac{a}{\bar{L}} \quad (6.2)$$

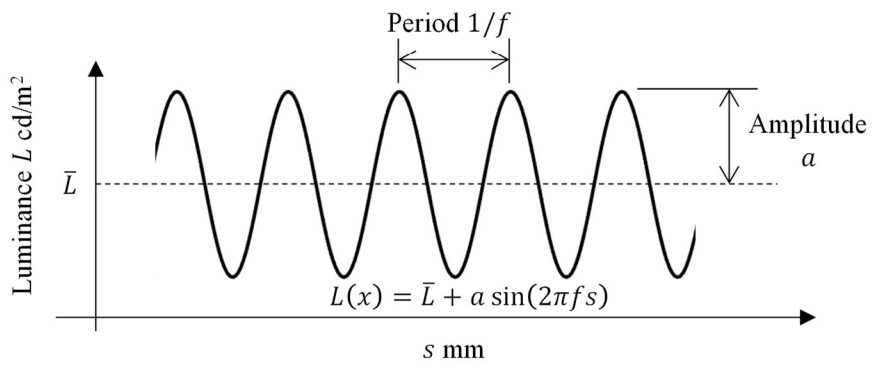
とおき、それぞれの f に対して縞模様を知覚できる最小の C を C_{\min} とおくと、空間的コントラスト感度は $1/C_{\min}$ であらわされる。空間的コントラスト感度 $1/C_{\min}$ を f の関数としてあらわしたものがコントラスト感度関数である。コントラスト感度関数の測定については複数の研究がなされており、De Valois ら[74]の測定結果では、コントラスト感度関数の概形がバンドパスフィルタに似ており、空間周波数が 1~10 c/d (count per degree, または cycle per degree) のときにコントラスト感度は最大となる。ここで空間周波数の単位 c/d は視野角 1°に含まれる正弦波模様の周期の数をあらわす。またコントラスト感度は \bar{L} に依存し、 \bar{L} が大きくなるほどコントラスト感度は高くなる。すなわち、わずかな明暗の振幅でも縞模様を知覚しやすくなる。コントラスト感度は f と \bar{L} に依存するが、 $f < 20$ c/d では 10~100 のオーダーであり、空間的コントラストが 0.01~0.1 以上であれば縞模様を視認できることになる。

一般にコントラスト感度関数は、式(6.1)であらわされるような単純な正弦波模様に対して式(6.2)により定義されており、本研究で扱う 2次元の輝度の模様については定義されていない。そこで本研究では、形式的に空間的コントラストを2次元に拡張して計算する。

2次元の輝度の模様に対して空間的コントラストを計算する手順を述べる。まず輝度の分布を、様々な空間周波数をもつ正弦波の重ね合わせであると考え次式のようにおく。



(a) Luminance sine wave



(b) Graph of luminance sine wave

Fig. 6.1 Luminance sine wave

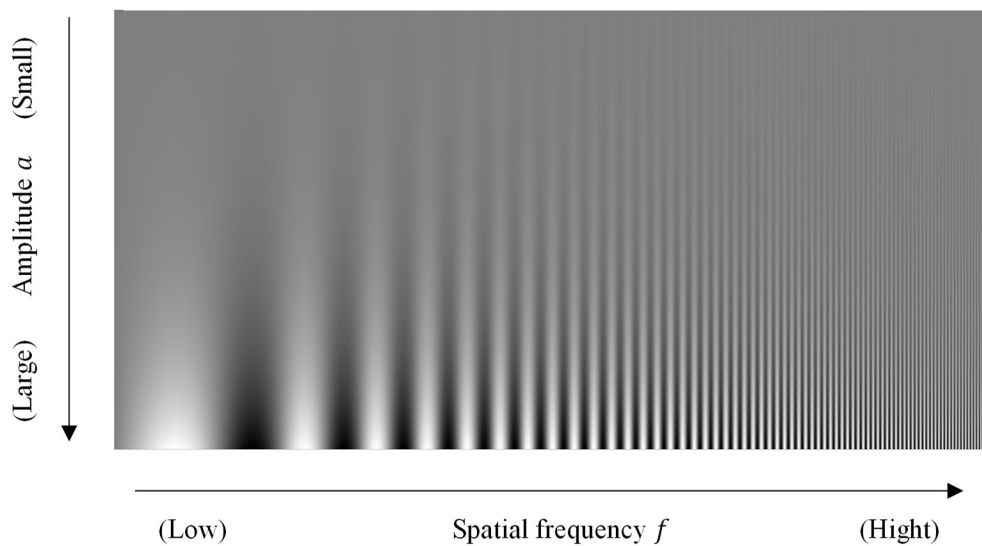


Fig. 6.2 Luminance sine wave with various spatial frequency f and amplitude a
 (鵜飼ら, 2007[34], p. 209, 図 8.5 を参考として作成)

$$L(s, t) = \bar{L} + \sum_{f_s, f_t} a(f_s, f_t) \sin[2\pi f_s(s - \phi_s)] \sin[2\pi f_t(t - \phi_t)] \quad (6.3)$$

ここで f_s, f_t はそれぞれ s, t 方向の空間周波数であり, ϕ_s, ϕ_t はそれぞれの空間周波数の正弦波の位相をあらわす. このとき, それぞれの空間周波数および正弦波の傾きに対して, 輝度の空間的コントラスト $C(f_s, f_t)$ を次式により計算する.

$$C(f_s, f_t) = \frac{a(f_s, f_t)}{\bar{L}} \quad (6.4)$$

空間的コントラストを計算する際は, まず解析対象の輝度分布から式(4.1)により \bar{L} を求め, 次に2次元フーリエ変換により $a(f_s, f_t)$ を計算する. 最後に式(6.4)により $C(f_s, f_t)$ を得る.

6.2.2 ガボール変換による輝度分布の局所的な特徴の検出

ガボール変換では, 解析対象の画像にガボールフィルタを適用することで新しい画像を生成する. 画像内での位置を (s, t) , 空間周波数を f , 傾きを θ_r とすると, ガボールフィルタは次式に示すように, ガウス関数と三角関数を用いてあらわされる[69].

$$g(s, t, f, \theta_r, \sigma) = \frac{1}{4\pi\sigma} \exp\left[-\frac{s^2 + t^2}{4\sigma^2}\right] \exp[i \cdot 2\pi f \cdot \xi] \quad (6.5)$$

ただし, ξ は次式により s, t 軸を回転して得られる.

$$\begin{pmatrix} \xi \\ \eta \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta_r & \sin \theta_r \\ -\sin \theta_r & \cos \theta_r \end{bmatrix} \begin{pmatrix} s \\ t \end{pmatrix} \quad (6.6)$$

図 6.3 に, f, θ_r, σ を変化させたときのガボールフィルタの例を示す.

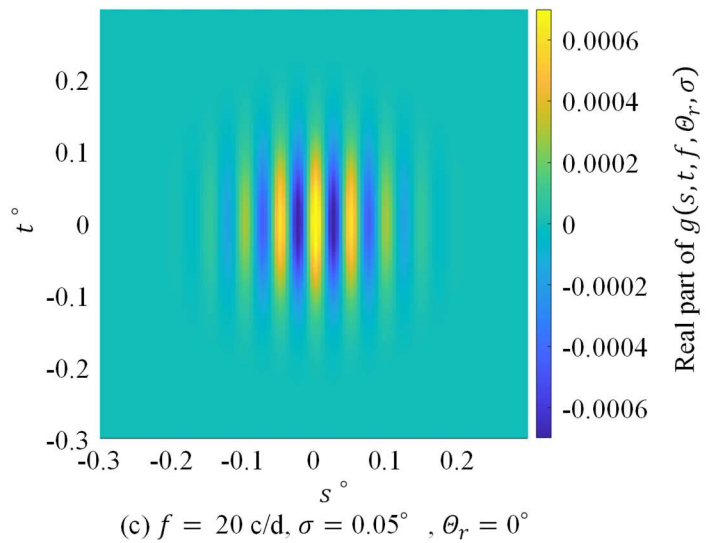
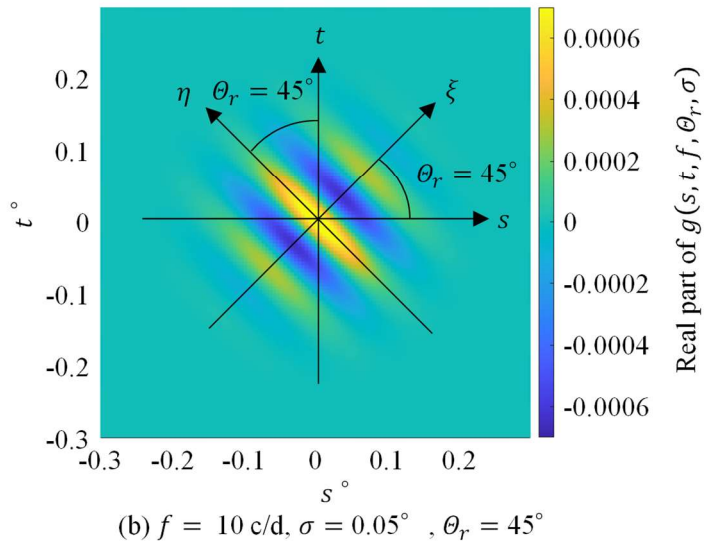
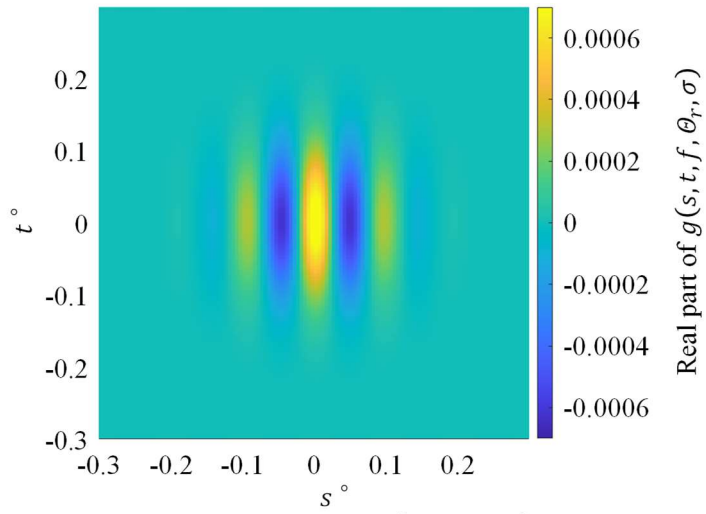


Fig. 6.3 Example of Gabor filter

元の画像データにおける位置 (s, t) での濃淡値や輝度値を $A(s, t)$ とおくと、ガボール変換の結果として得られる画像データ $G(s, t)$ は次式により計算される。

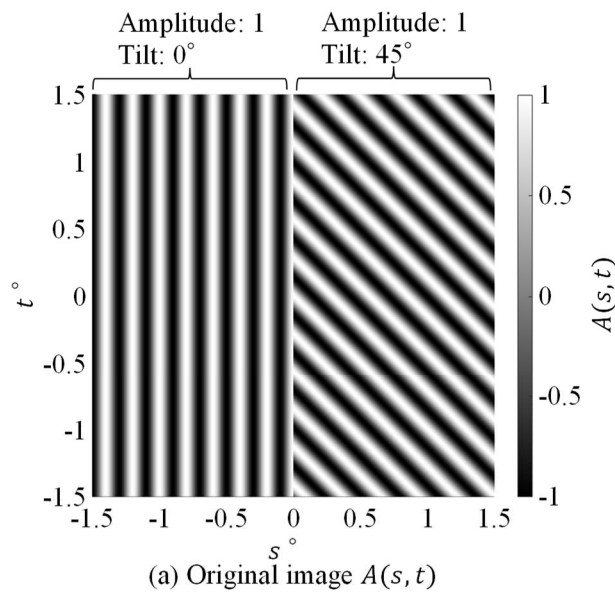
$$G(s, t) = \iint_{\text{画像データ全体の範囲}} A(s', t') g(s' - s, t' - t, f, \theta_r, \sigma) ds' dt' \quad (6.7)$$

ここで $G(s, t)$ は一般に複素数である。式(6.7)では積分範囲が画像データ全体の範囲であるが、式(6.5)に示したように $g(s, t, f, \theta_r, \sigma)$ にはガウス関数が含まれている。このため、パラメータ σ によって決まる、ガウス関数が値を持つ範囲内で平均化しながら、局所ごとの空間周波数および傾きが検出される。

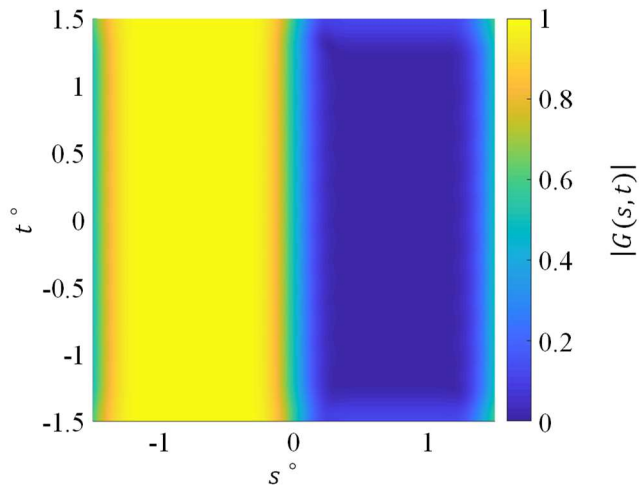
図 6.4 に、正弦波の明暗の模様をもつ画像データにガボール変換を適用した例を示す。同図(a)に示す元の画像 $A(s, t)$ では、明暗の振幅が 1 で一定であるが、左半分では正弦波が s 軸に平行であるのに対し、右半分では 45° 傾いている。このとき、同図(b)に、図 6.3(a)に示した $f = 10$ [c/d], $\sigma = 0.05^\circ$, $\theta_r = 0^\circ$ のガボールフィルタを適用して $G(s, t)$ の絶対値を計算した結果を示す。左半分の値が 1 であるのに対して右半分では 0 となっており、ガボールフィルタと同じ空間周波数と傾きをもった模様が左半分の領域にあり、右半分には無いことを示している。また図 6.4 (c)には、図 6.3(b)に示した $f = 10$ [c/d], $\sigma = 0.05^\circ$, $\theta_r = 45^\circ$ のガボールフィルタを適用して $G(s, t)$ の絶対値を計算した結果を示す。 $A(s, t)$ で右半分には 45° 傾いた模様があり左半分にはないため、計算結果では右半分で値が 1 であるのに対し左半分では 0 である。なお、同図(b)(c)では画像の端から約 0.2° の領域で計算結果が一定でない。これはガボールフィルタ自体が st 平面内で大きさをもっており、元の画像の端部ではフィルタの一部が含まれないためである。

Anderson ら[71]は V1 での空間周波数と傾きの検出をガボールフィルタとみなしてモデル化し、式(6.5)において受容野の大きさをあらわすパラメータ σ と空間周波数 f の関係を実験により測定した。Anderson らの測定結果によれば、 f が高くなるにつれて σ が小さくなっている。すなわち正弦波の模様が細くなるほど視野の小さな領域で処理が行われることになる。Anderson らの測定結果を元に、 σ と f の間の関係を次式により近似する。ただし f の単位は c/d である。

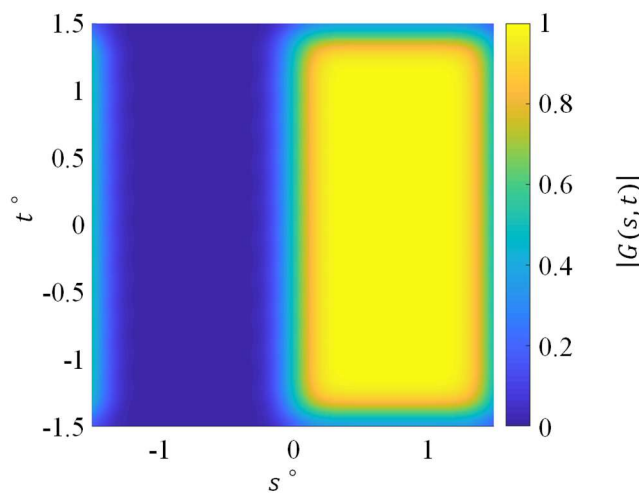
$$\sigma = \left(\frac{1}{10f} \right)^{0.7} \quad (6.8)$$



(a) Original image $A(s, t)$



(b) Calculated distribution of $|G(s, t)|$ when $f = 10$ c/d, $\sigma = 0.05^\circ$, $\theta_r = 0^\circ$



(c) Calculated distribution of $|G(s, t)|$ when $f = 10$ c/d, $\sigma = 0.05^\circ$, $\theta_r = 45^\circ$

Fig. 6.4 Example of original image and result of Gabor transform

6.3 切削実験と加工面の外観

切削模様が均一に見える加工面と不均一に見える加工面を用意するため、切削実験をおこなった。加工セットアップは図 4.22(a)と同じであり、45°に傾けた平面を切削した。

切削模様の均一さを変化させる方法として2つを試みた。1つ目は切削パスの長さを変化させる方法である。本実験においてアップカットで切削する場合の切削パスは、図 6.5 に示すように、まず Y 軸正の方向に工具を送って切削し、X 軸正の方向、Y 軸負の方向、X 軸負の方向、Z 軸負の方向の順とした。ここで X 軸の方向に送る距離を変化させると、切削している間の工具の回転の位相がピックフィード方向に変化し、結果として切削模様が異なって見えることが予想される。2つ目は、Y 軸負の方向に工具を送って切削することで、アップカットとは逆にダウンカットで切削する方法である。

上述の方法で3種類の加工面 C, D, E を用意した。表 6.1 に切削条件を示す。加工面 C を基準とし、D では上述の1つ目の方法で、E では2つ目の方法で、それぞれ切削パスの長さや方向を変化させて加工した。

図 6.6 に加工面 C, D, E の写真を示す。加工面 C は送りの正の方向からピックフィードの正の方向に向かう一様な切削模様が見えるが、加工面 D には一様な切削模様が見受けられない。また、加工面 E には、送り方向にもピック方向にも一定でない切削模様が見受けられる。

図 6.7 に、3個の加工面を光学顕微鏡で観察して得られた画像を示す。加工面 C では、ピックフィード方向に 0.2 mm 進むごとに、カスプ形状が均一に約 0.1 mm ずつ送り方向にずれている。その一方で、加工面 D ではピックフィード方向に進んだときにカスプ形状のずれが見受けられない部分と、送り方向に約 0.1 mm ずれている部分が見られる。光学顕微鏡でさらに広い範囲を観察した結果、ピックフィード方向に6回進むごとに1度、送り方向に約 0.1 mm のずれが見られた。図 6.5 に示した切削パスにおける各経路は加工中で一定としたため、C と同様にずれ量は一定となると予想されたが、一定とならなかった原因は不明である。加工面 E では、ピックフィード方向に進むごとにカスプ形状が送り方向に約 0.1 mm ずつずれる傾向は加工面 C と同様であり、さらにカスプ形状の中でピックフィード方向に微細な線が見られる。

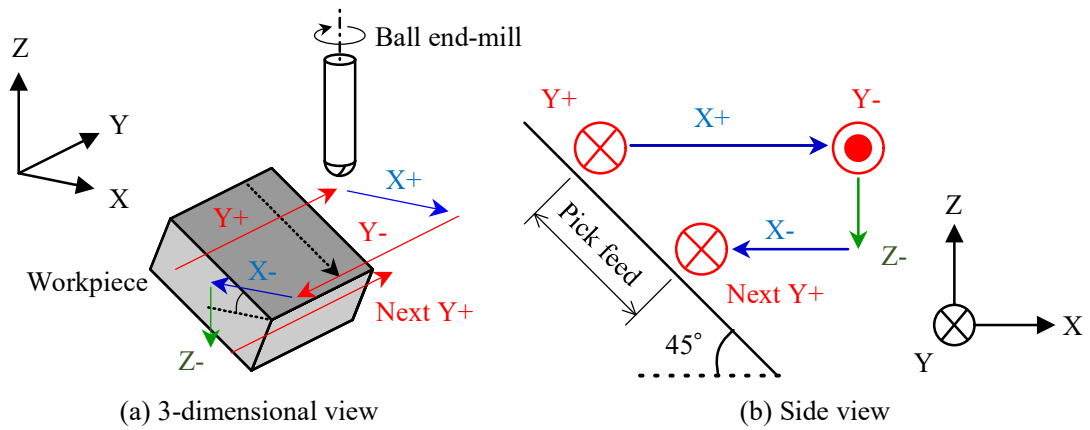


Fig. 6.5 Tool path used in cutting workpieces C and D

Table 6.1 Cutting conditions of workpieces C, D and E

Workpiece number	C	D	E
Workpiece material	STAVAX (52 HRC)		
Tool material	Coated cemented carbide		
Tool	2-tooth ball end-mill, radius: 1 mm		
Rotation speed	11000 min ⁻¹		
Depth of cut	0.05 mm		
Pick feed	0.2 mm		
Feed rate	4400 mm/min		
Coolant	Oil mist		
Up-cut or down-cut	Up-cut	Up-cut	Down-cut
X+ length in Fig. 6.5	1.6 mm	3.4 mm	1.6 mm

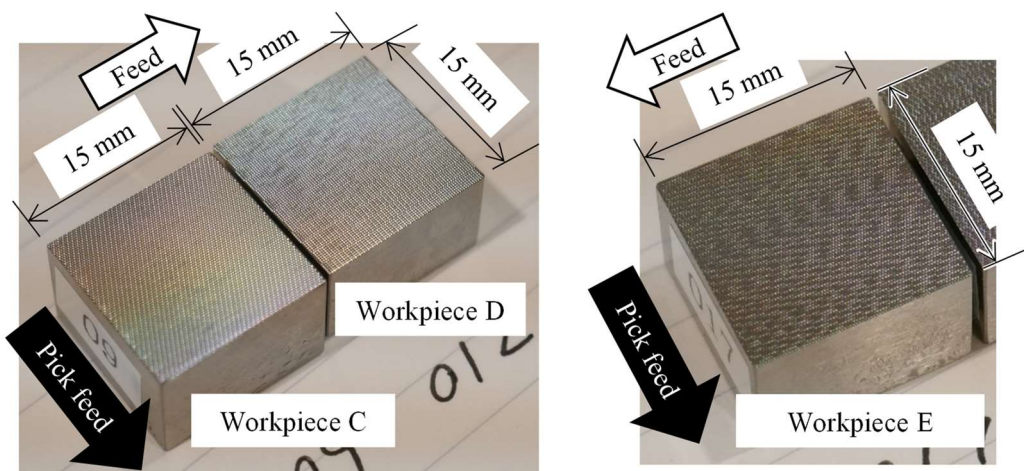


Fig. 6.6 Photograph of workpieces C, D and E

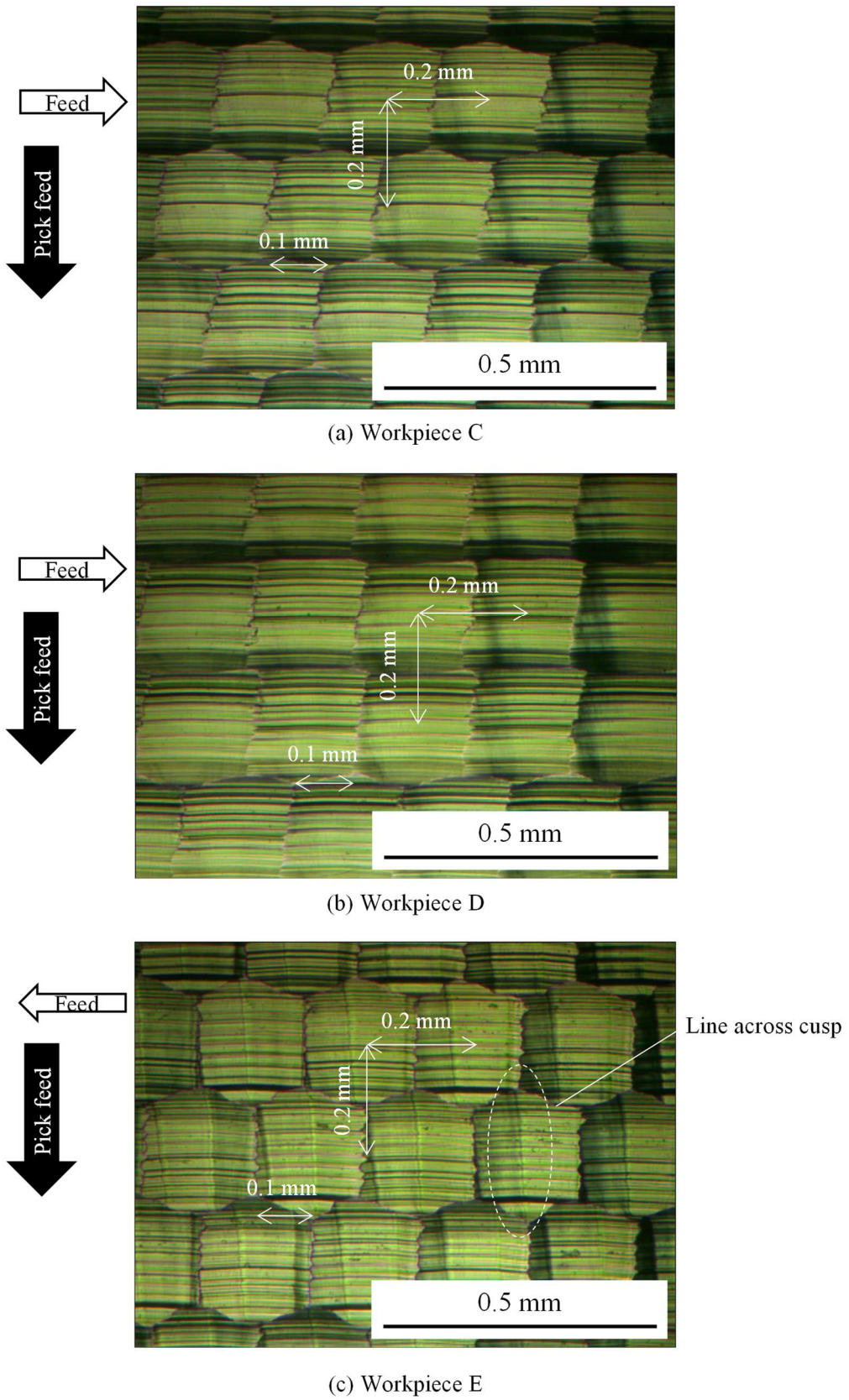


Fig. 6.7 Optical microscope image of workpieces C, D and E

6.4 加工面の測定と解析

6.4.1 形状測定と視覚シミュレーション

加工面の形状を3箇所ずつ、白色干渉計により測定した。測定の条件は表 5.1 と同じである。図 6.8 に測定で得られた形状データを示す。加工面 D については、同図(b)にカスプ形状のずれが含まれている領域 1 を、(c)には含まれていない領域 2 を示す。表面粗さ Sa の値は、C では $2.084 \pm 0.006 \mu\text{m}$ 、D では $2.010 \pm 0.035 \mu\text{m}$ 、E では $1.672 \pm 0.014 \mu\text{m}$ であった。加工面 C、D の形状データを比較すると、図 6.7 に示した光学顕微鏡画像と同様に、C ではカスプ形状のずれが一定であるのに対して D ではずれが無い部分とある部分がある。加工面 C、E の形状データを比較すると、ピックフィールド方向に進むごとに約 0.1 mm ずつカスプ形状が送り方向にずれている傾向が共通して見受けられるものの、図 6.7(c)に示した E の光学顕微鏡画像に見られたような、カスプ形状に含まれるピックフィールド方向の微細な線を見出すことは難しい。

加工面 C、E の形状の差について詳細に調べるため、図 6.8(a)(d)に示した線に沿ってそれぞれ断面形状をプロットした。図 6.9 に得られた断面形状を示す。加工面 C ではカスプ形状が比較的均一であるのに対し、E では $0.1 \mu\text{m}$ オーダの微細な凹凸が見られる。このような微細な形状の差によって反射光の強度が変化し、特に E では光学顕微鏡画像に見られたようなカスプ形状の中の線が生じたと考えられる。さらに、4.3.3.1 節で示した手順と同様に、加工面の真上から照明光が入射し真上から観察した場合の反射光の強度分布 $\langle I_{\text{out}} \rangle$ を計算した。空間分解能は形状データと合わせ $2L_{xy} = 1.1 \mu\text{m}$ とし、光の波長は $\lambda = 555 \text{ nm}$ とした。図 6.10 に計算結果を示す。加工面 E においてピックフィールド方向に境界のような線が見られ、光学顕微鏡画像の傾向と一致する。

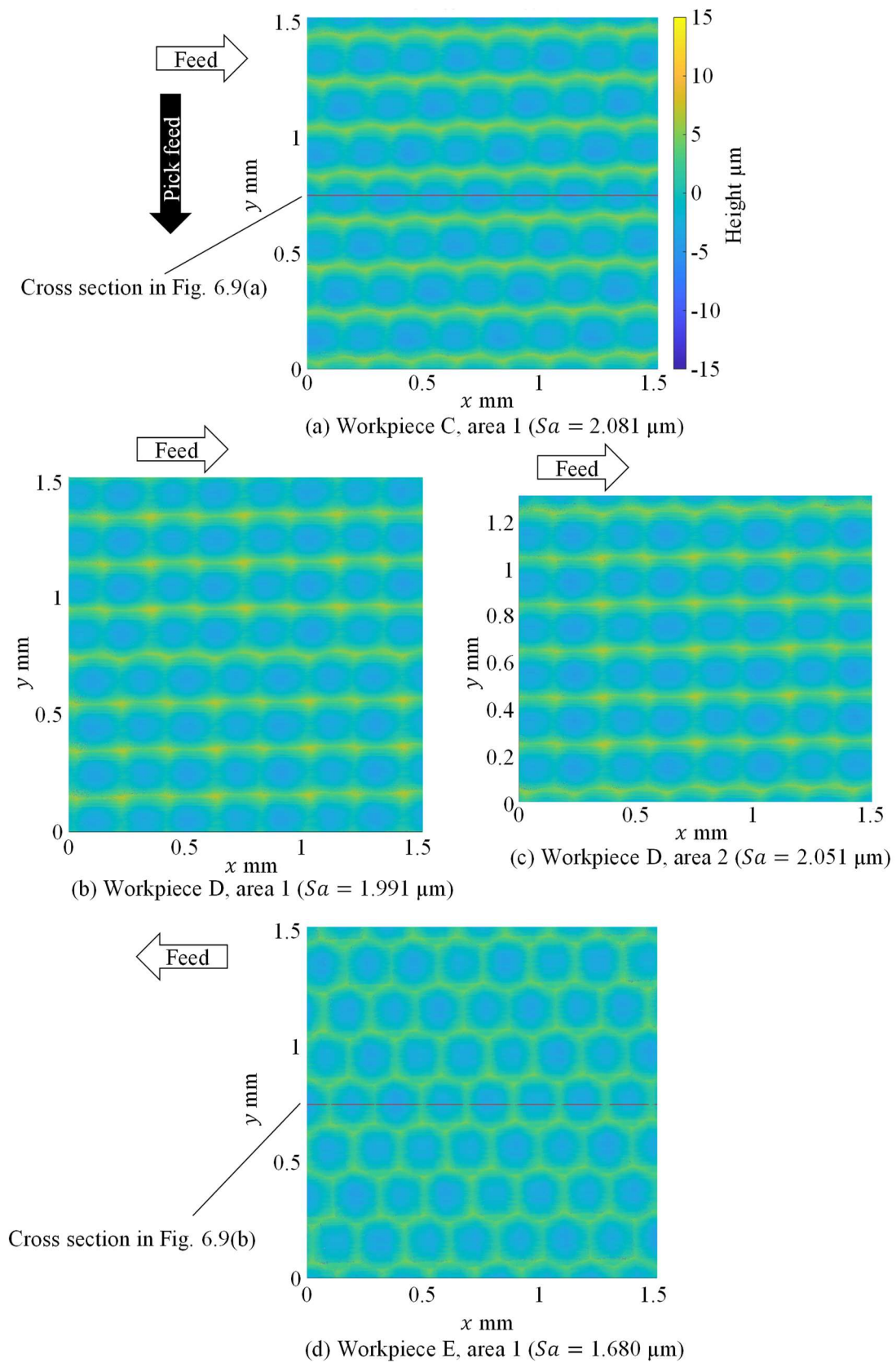


Fig. 6.8 Surface shape of workpieces C, D and E measured by white-light interferometer

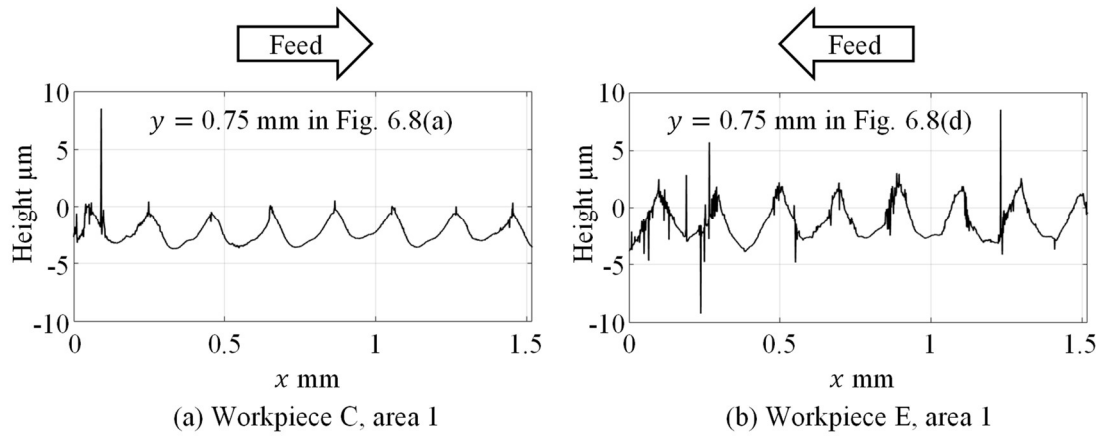


Fig. 6.9 Cross-sectional shape of workpieces C and E

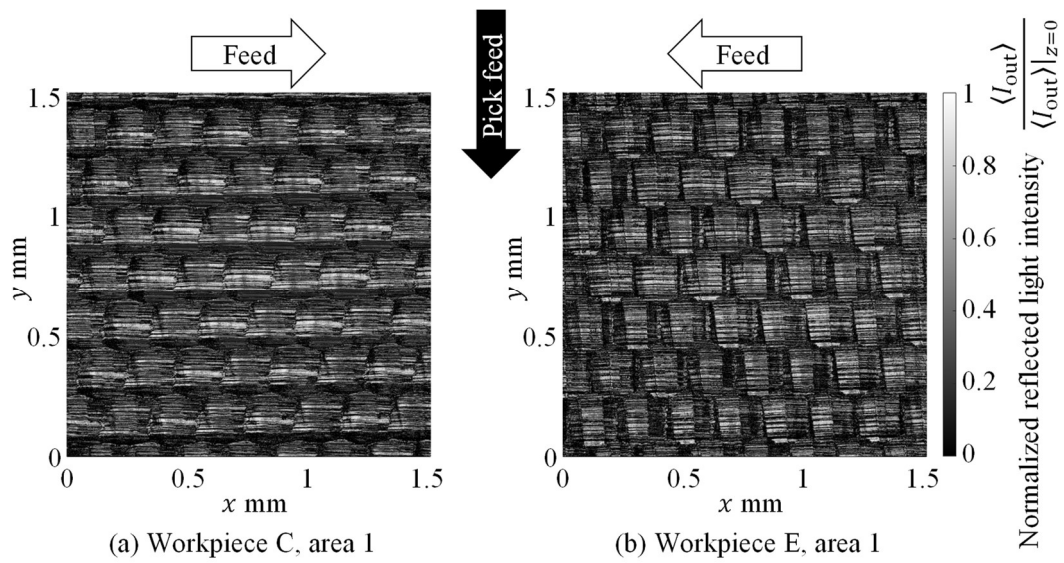


Fig. 6.10 Simulated distributions of normalized reflected light intensity $\langle I_{out} \rangle / \langle I_{out} \rangle|_{z=0}$ of workpieces C and E when wavelength $\lambda = 555 \text{ nm}$

次に、加工面 C, D, E の輝度分布を計算するため視覚シミュレーションをおこなった。照明光には図 4.28 で示した LED 平行光光源の照明光の分光分布を用いた。屈折率のデータについては、4.4 節において工具、被削材とも同じ材質の加工面 A のデータを用いることとし、図 4.26 の青印で示されたデータにより計算をおこなった。図 6.11 のように、送り方向に垂直に照明光を当て観察する場合を仮定した。表 6.2 に条件を示す。

図 6.12 に、視覚シミュレーションにより計算された輝度分布を示す。加工面 C と D では、カスプ形状に対応する輝度の高低の様子が一定の間隔で整って並んでいる。さらに光学顕微鏡画像と同様に、C ではカスプ形状のずれが一定であるのに対し、D ではずれが無い部分と約 0.1 mm 程度の部分がある。加工面 E では、カスプ形状に対応する輝度の高低の様子が均一ではなく、送り方向とピックフィード方向の両方に変化している傾向が見られる。

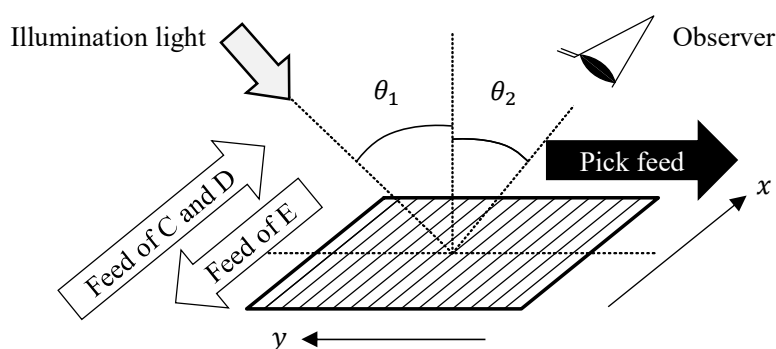


Fig. 6.11 Directions of illumination light and observation in visual simulation of workpieces C, D and E

Table 6.2 Conditions of visual simulation for workpieces C, D and E

Illumination light	LED light shown in Fig 4.28
Observation distance	$D = 150 \text{ mm}$
Illumination direction	$\theta_0 = 90^\circ, \theta_1 = 45^\circ$
Observation direction	$\theta_2 = 40^\circ, \theta_3 = 270^\circ$

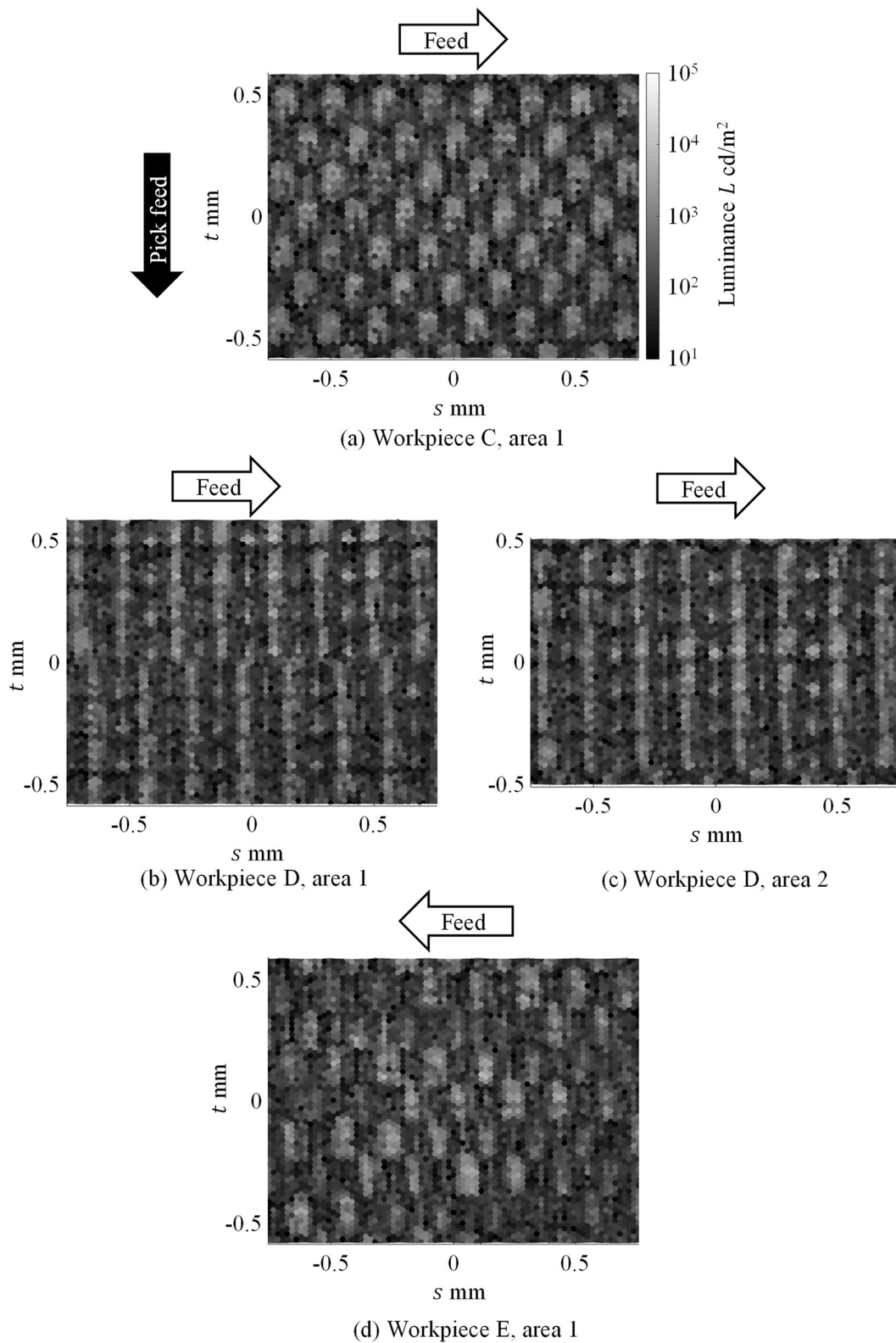


Fig. 6.12 Simulated luminance distribution of workpieces C, D and E

6.4.2 加工面 C の解析

図 6.12(a)に示した加工面 C の輝度分布の計算結果に 2 次元フーリエ変換を適用し、空間的コントラストを計算した。図 6.13 に得られた空間的コントラストの分布を示す。図中で横軸と縦軸はそれぞれ s 軸, t 軸方向の空間周波数 f_s, f_t をあらわし、単位は c/d である。また色はそれぞれの空間周波数でのコントラスト $C(f_s, f_t)$ の大きさをあらわす。同図では、 s 軸方向すなわち視野に対して水平の方向で $\pm 12.5 c/d$ の部分に比較的高いピークが見られる。 $f_s = -12.5 c/d, f_t = 10 c/d$ におけるコントラストは 0.59 であり、6.2.1 節で述べた縞模様を視認するのに必要なコントラストを上回っていることから、切削模様が視認できることを説明できたと言える。また、加工実験における 1 刃あたりの送り量は 0.2 mm であり、観察距離 D が 150 mm であることから視野角に変換すると約 0.76° となり、空間周波数では約 $13 c/d$ である。したがって、 $12.5 c/d$ のピークは 1 刃あたりの送り量に対応していると考えられる。

ガボール変換をおこなうとき、ガボールフィルタの空間周波数と傾きを設定する必要がある。空間周波数は、輝度分布に見られる正弦波模様のうちコントラストの大きな成分を選ぶこととする。図 6.13 に示したコントラストでは、 s 軸方向に空間周波数 $f = 12.5 c/d$ の正弦波模様があることが示された。そこで空間周波数を $f = 12.5 c/d$ 、傾きを $\theta_r = 0^\circ$ としガボールフィルタを作成した。式(6.8)より、ガボールフィルタのパラメータ σ は 0.034° と計算された。図 6.14 に作成したガボールフィルタの実部を示す。

図 6.12(a)に示した輝度分布にガボール変換を適用し $G(s, t)$ を計算した。図 6.15 に、計算された $G(s, t)$ の絶対値 $|G(s, t)|$ の分布を示す。ガボール変換では、元の画像の端の部分ではフィルタの一部が含まれないため、計算誤差が生じる。図 6.14 に示したガボールフィルタは、半径で約 0.1° の広がりをもっており、画像の端から約 0.1° の部分には計算誤差が含まれると考えられるため、図 6.15 中の白線の枠内に注目した。枠内での $|G(s, t)|$ の最大値と最小値の差（高低差、P-V value）は 36.6 cd/m^2 であった。

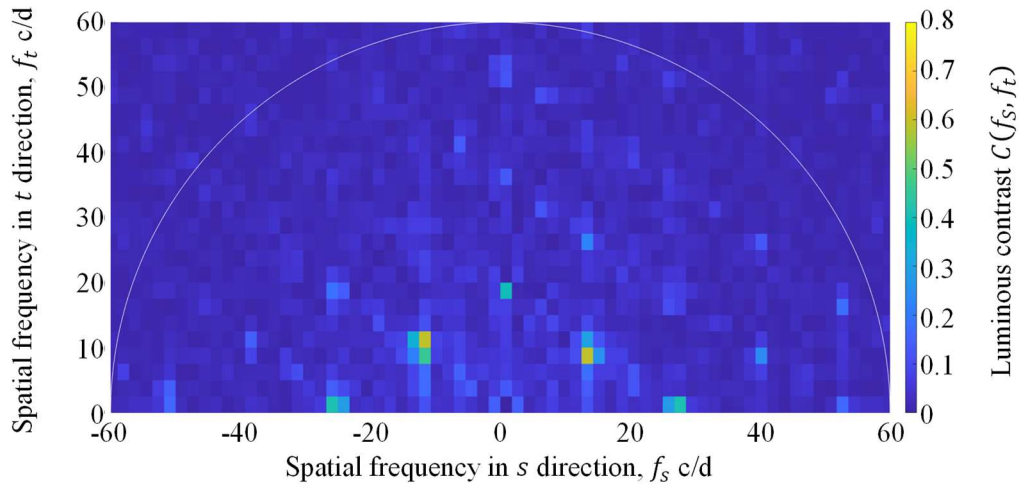


Fig. 6.13 Calculated luminous contrast of workpiece C

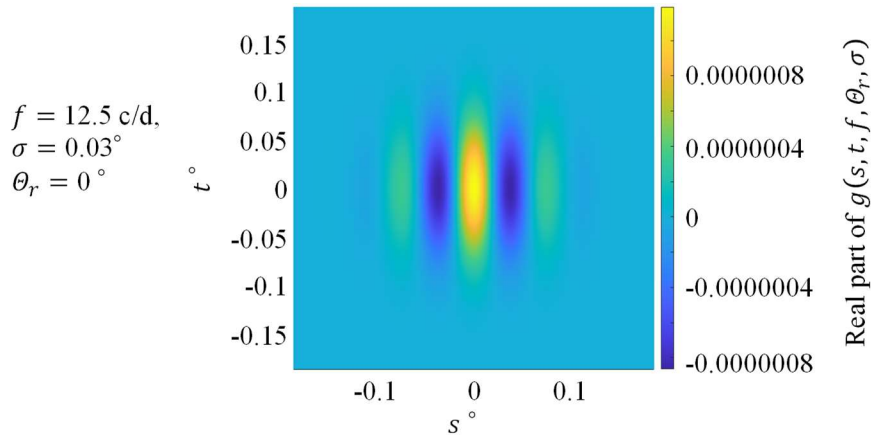


Fig. 6.14 Gabor filter applied to simulated luminance distribution of workpieces C, D and E

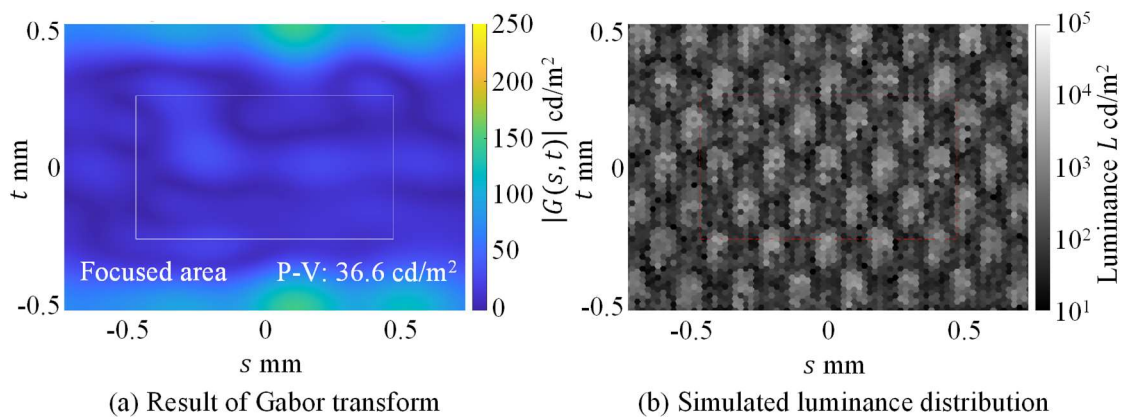


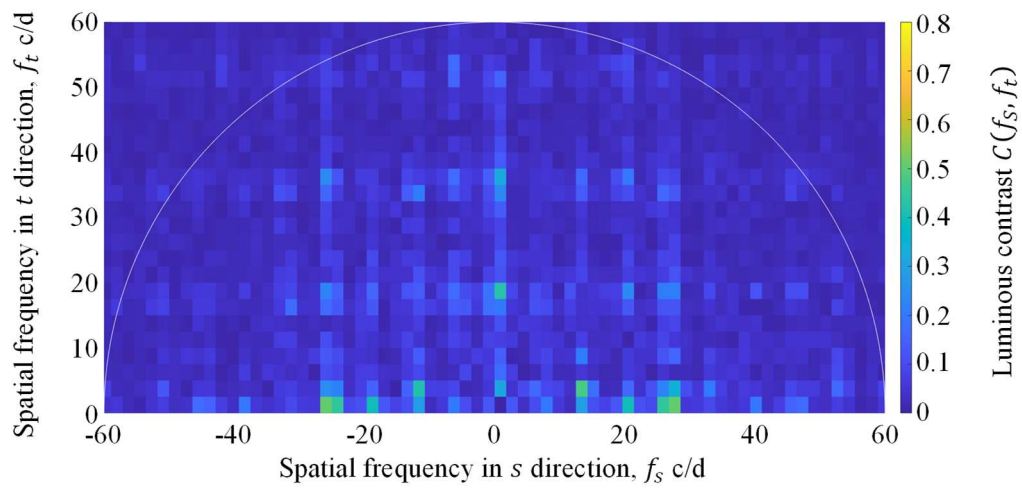
Fig. 6.15 Result of Gabor transform on simulated luminance distribution of workpiece C

6.4.3 加工面 D の解析

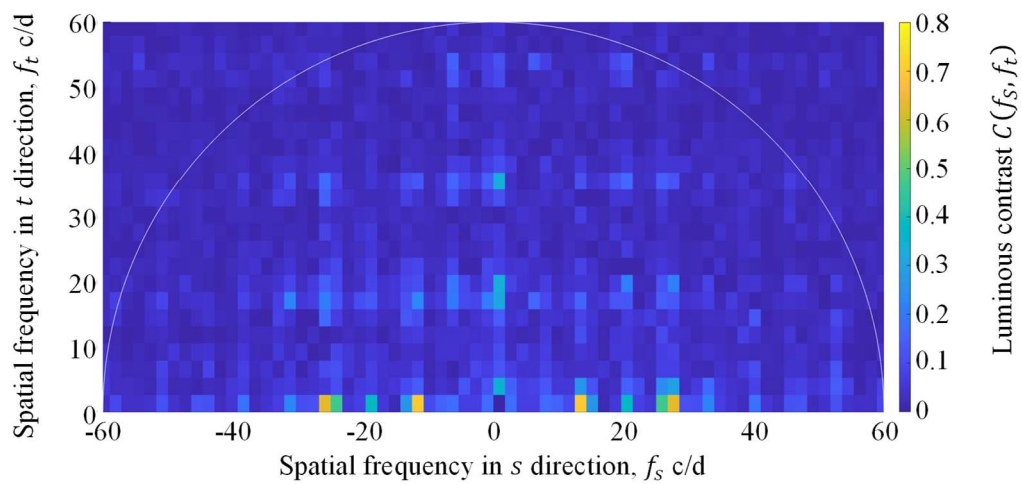
図 6.12(b)(c)に示した加工面 D の領域 1, 2 に対して計算した輝度分布に 2 次元フーリエ変換を適用し, 空間的コントラストを計算した. 図 6.16 に得られたコントラストの分布を示す. 加工面 C の計算結果と同様に, s 軸方向の ± 12.5 c/d の部分に比較的高いピークが見られ, 1 刃あたりの送りに対応していると考えられる. さらに, 同図(a)では空間周波数 $f_s = 12.5$ c/d, $f_t = 2.5$ c/d においてコントラスト $C = 0.48$ であるのに対し, (b)では $f_s = 12.5$ c/d, $f_t = 0$ c/d で $C = 0.70$ であり, (b)の方が約 40%大きい. (b)では輝度の正弦波模様になれないために, $f_s = 12.5$ c/d の成分の計算結果が大きくなったと考えられる. したがって空間的コントラストの大小が切削模様のずれの有無と対応していると言える. また両方の領域のコントラストが, 6.2.1 節で述べた縞模様を視認するのに必要なコントラストを上回っていることから, 切削模様が視認できることを説明できたと言える.

得られた輝度分布にガボール変換を適用した. 図 6.17 に領域 1, 2 での $|G(s, t)|$ の計算結果を示す. 比較のため, 図 6.12(b)(c)に示した輝度分布の計算結果を再掲する. 加工面 C と同様に図中の白線枠内に注目すると, s 軸方向に比較的低い箇所が見受けられる. これは, 輝度のパターンがずれている部分に対応すると考えられる. したがって, 輝度分布に見られるようなカスプ形状のずれによる不均一さが, ガボール変換の結果にもみられると言える. 白線枠内の $|G(s, t)|$ の高低差は領域 1 では 148.8 cd/m² で, 領域 2 では 168.8 cd/m² であり, 差は約 10%でコントラストの差よりも小さい. これは, 領域 2 の中央部に輝度の高い箇所が分布しているためであると考えられる. カスプ形状のずれによる不均一さを定量化するには, $|G(s, t)|$ を正規化するなどの計算手法が必要であると考えられる.

なお, 領域 1 においてカスプ形状のずれを検出するには, 空間的コントラストを計算する場合には領域 2 と比較する必要があるが, ガボール変換を用いる際には領域 1 の輝度分布のみを用いればよい.

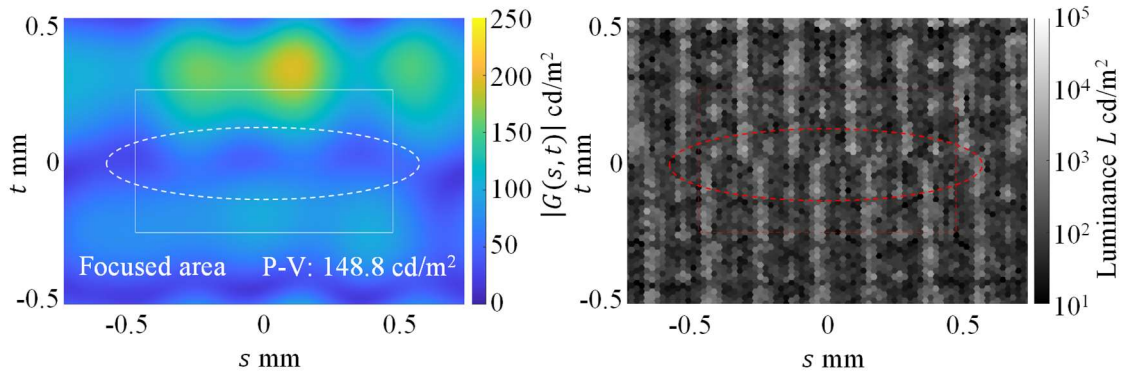


(a) Area 1

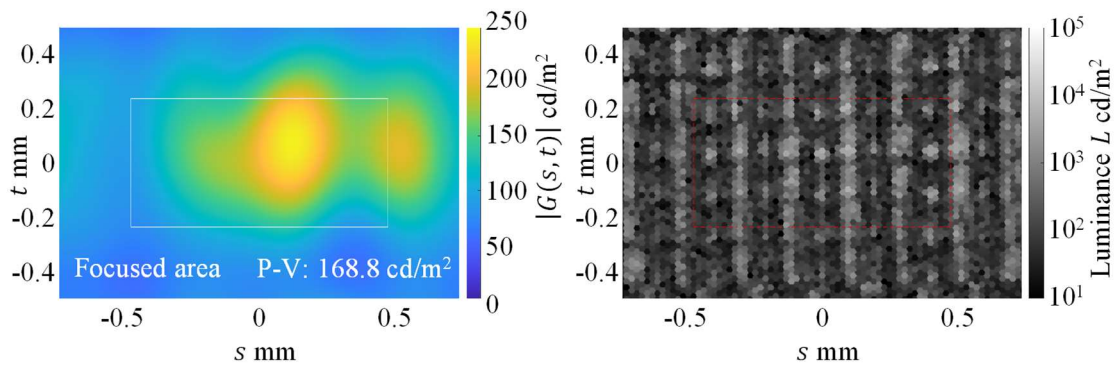


(b) Area 2

Fig. 6.16 Calculated luminous contrast of workpiece D



(a) Area 1



(b) Area 2

Fig. 6.17 Result of Gabor transform on simulated luminance distribution of workpiece D

6.4.4 加工面 E の解析

図 6.12(d)に示した加工面 E の輝度分布の計算結果に 2 次元フーリエ変換を適用し、空間的コントラストを計算した。図 6.18 に得られた空間的コントラストの分布を示す。加工面 C の計算結果と同様に、 s 軸方向の ± 12.5 c/d の部分に比較的高いピークが見られ、1 刃あたりの送りに対応していると考えられる。 $f_s = -12.5$ c/d, $f_t = 7.5$ c/d においてコントラスト $C = 0.71$ であり、6.2.1 節で述べた縞模様を視認するのに必要なコントラストを上回っていることから、切削模様が視認できることを説明できたと言える。

図 6.19 に、ガボール変換の結果得られた $|G(s, t)|$ の分布を示す。同図(a2)には比較のため、図 6.12(d)に示した領域 1 の輝度分布を再掲する。また、同図(b)(c)には、領域 2, 3 の形状データについて同様に輝度分布を計算しガボール変換をおこなった結果も示す。同図(a)において白線枠内の $|G(s, t)|$ の分布に注目すると、値が比較的大きい部分と小さい部分に分かれている。比較的大きい部分は、輝度分布において輝度が比較的高い部分に相当していると考えられる。したがって、輝度分布にみられるような不均一さが、ガボール変換の結果にもみられると言える。

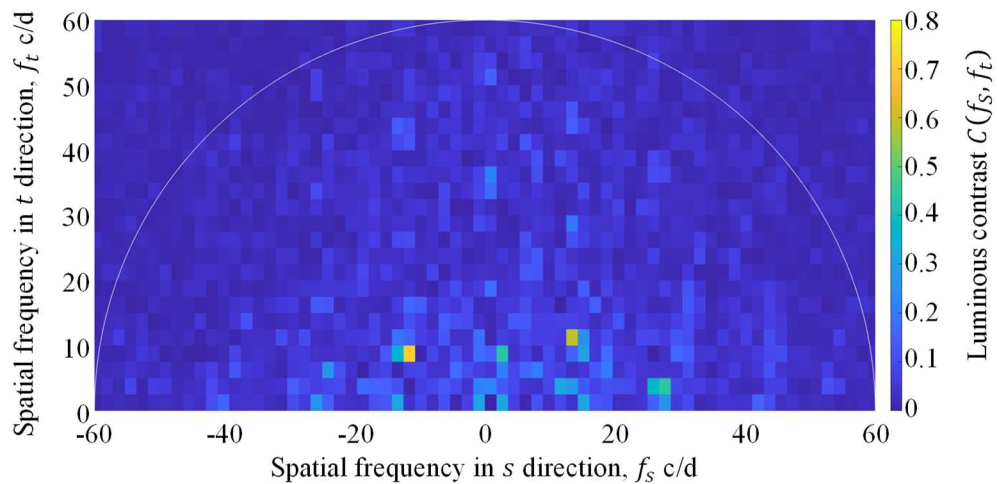
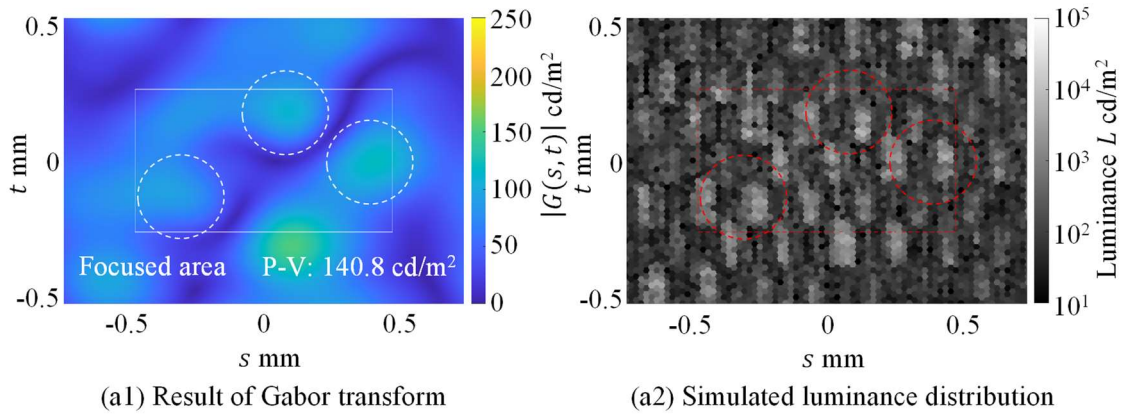
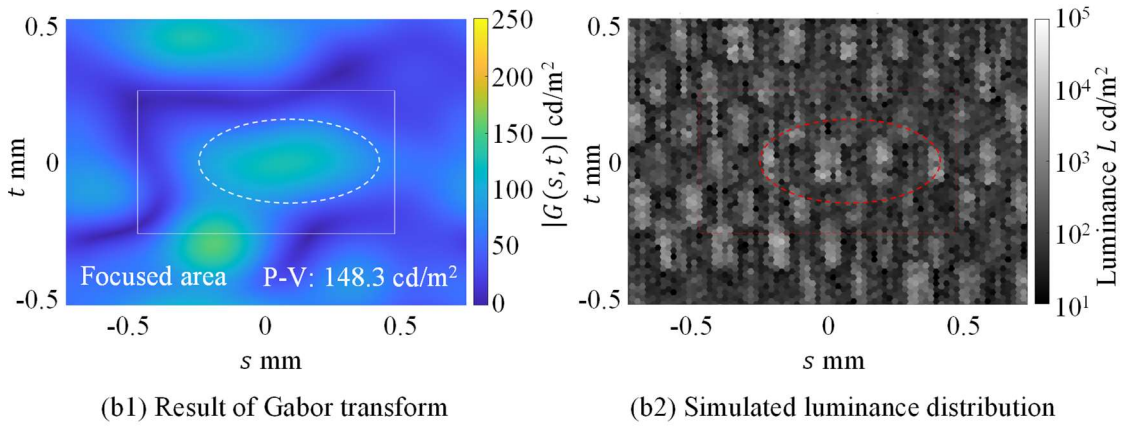


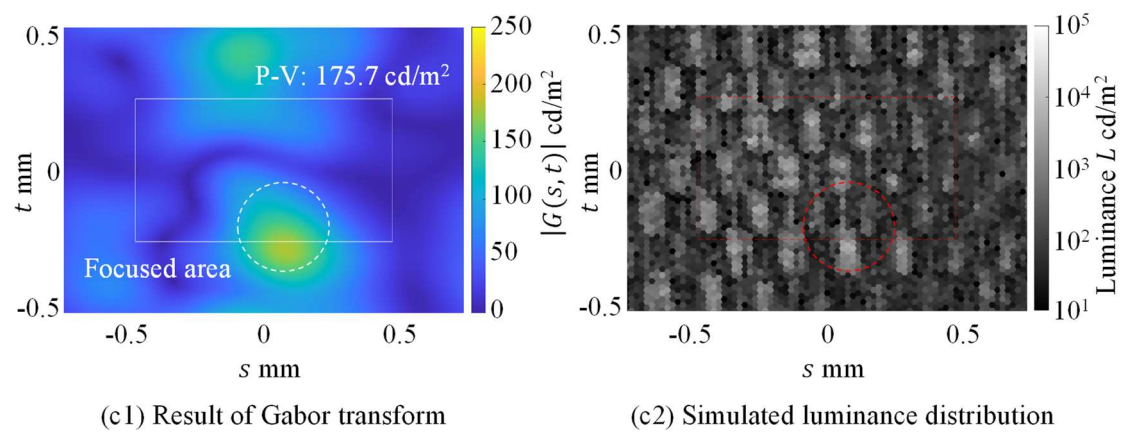
Fig. 6.18 Calculated luminous contrast of workpiece E, area 1



(a) Area 1



(b) Area 2



(c) Area 3

Fig. 6.19 Result of Gabor transform on simulated luminance distribution of workpiece E

6.4.5 3種類の加工面の解析結果の比較

表 6.3 に、加工面 C, D, E の空間的コントラストの計算結果と、ガボール変換の結果における $|G(s, t)|$ の高低差の計算結果を以下にまとめる。

均一な切削模様をもつ加工面 C のコントラストは約 0.6 であるのに対し、不均一な切削模様をもつ加工面 D では約 0.4~0.7, 加工面 E では約 0.6~0.7 であり、C の計算結果が D, E の 80~150% である。ガボール変換で得られた $|G(s, t)|$ の高低差を比較すると、C の計算結果は D, E の 20~30% である。したがって、加工面 D, E に比べて C が均一であることを定量的に表現するうえで、2次元フーリエ変換により空間的コントラストを計算するよりもガボール変換を用いる方が差は大きい。よって、ガボール変換の方が、均一な切削模様と不均一な切削模様の差を検出しやすいと言える。

Table 6.3 Calculated contrast and P-V values of $|G(s, t)|$ of workpieces C, D and E

Workpiece number	Area number	Contrast C at spatial frequency equivalent to feed per tooth	P-V value of $|G(s, t)|$ cd/m ²
C	1	0.59 at $f_s = -12.5$ c/d, $f_t = 10$ c/d	36.6
	2	0.58 at $f_s = -12.5$ c/d, $f_t = 10$ c/d	25.1
	3	0.62 at $f_s = -12.5$ c/d, $f_t = 10$ c/d	54.7
D	1 (Containing cusp gap)	0.48 at $f_s = 12.5$ c/d, $f_t = 2.5$ c/d	148.8
	2 (Not containing cusp gap)	0.70 at $f_s = \pm 12.5$ c/d, $f_t = 0$ c/d	168.8
	3 (Containing cusp gap)	0.43 at $f_s = -12.5$ c/d, $f_t = 2.5$ c/d	131.5
E	1	0.71 at $f_s = -12.5$ c/d, $f_t = 7.5$ c/d	140.8
	2	0.58 at $f_s = -12.5$ c/d, $f_t = 7.5$ c/d	148.3
	3	0.69 at $f_s = -12.5$ c/d, $f_t = 7.5$ c/d	175.7
	4	0.60 at $f_s = -12.5$ c/d, $f_t = 7.5$ c/d	167.2

6.5 結論

切削模様の均一さについて、視覚シミュレーションにより計算された輝度分布に 2 次元フーリエ変換をおこなって空間的コントラストを計算する方法と、ガボール変換を適用する方法を試みた。ボールエンドミルを用いた加工実験により、均一な切削模様をもつ加工面と、巨視的または微視的な要因のために不均一に見える切削模様をもつ加工面を用意し解析した。本章で得られた主な結論は以下の通りである。

- 1) 巨視的な要因のために不均一な切削模様をもつ加工面では、カスプ形状にずれがある部分と無い部分のコントラストの計算結果に差がみられた。またガボール変換の結果では、ずれがある部分の計算結果に輝度分布と同様の傾向がみられたが、ずれのある部分と無い部分を比較すると、ガボール変換の結果での高低差の差は、コントラストの差よりも小さかった。ただし、ガボール変換の結果では、ずれのある部分の計算結果のみから不均一さの傾向を検出できた。したがって、ガボール変換の結果を正規化するなどの計算手法を確立すれば、ガボール変換を用いて巨視的な要因による切削模様の不均一さを定量的に説明できると考えられる。
- 2) 微視的な要因のために不均一な切削模様をもつ加工面では、輝度分布に見られた不均一さと同様の傾向がガボール変換の結果にもみられた。したがって、ガボール変換を用いて微視的な要因による切削模様の不均一さを説明できると考えられる。
- 3) 均一な、または不均一な切削模様の差について、空間的コントラストの計算結果と、ガボール変換の結果での高低差を比較した結果、ガボール変換での差が比較的大きかった。したがってガボール変換を用いる方法は空間的コントラストを計算する方法に比べ、切削模様の均一さと不均一さの差を検出しやすいと言える。

第7章 結言

本論文では、切削加工面の良否判定における官能指標を解析することを目的とした。光沢の度合い、虹面、切削模様の均一さといった官能指標に注目し、官能評価における物理的・心理物理的な過程をモデル化した視覚シミュレーションを構築し、加工面の形状データから視覚情報を計算して官能指標を解析する方法とその結果について述べた。本研究で得られた結論を以下に示す。

- 1) 切削加工面を用いた官能評価アンケート調査では、加工面の表面粗さと良否の間に明らかな相関関係はみられなかった。また代表的な官能指標が、光沢の度合い、虹面の色、切削模様の均一さであることがわかった。
- 2) 官能評価における人間の視覚系の心理物理的な過程と、Beckmannの散乱理論に基づいて視覚シミュレーションを構築した。加工面の形状と屈折率、照明光の波長分布と方向、観察者の方向と観察距離を入力として、視覚情報である輝度と色を計算する。視覚シミュレーション手法の主な特徴は、人間の視覚の空間分解能を考慮している点と、加工面の形状を平均化せず用いて反射光の強度を計算している点である。
- 3) 光沢の度合いについて、切削速度の異なるアルミニウム合金 A2017 旋削加工面の官能評価をおこなったところ、初心者の評価結果には、主に「きれいな光沢」と「白っぽい」の2種類があった。熟練者は「推奨条件」「切れてない」を判別したが、初心者には判別できなかった。加工面の形状から反射光の強度分布を計算したところ、特に切削方向に沿った $0.1\ \mu\text{m}$ スケールの微細な条痕の多少について光学顕微鏡の観察画像と同様の傾向が見られた。さらに、視覚シミュレーションを用いて反射輝度分布曲線を描いた結果、初心者が異なる表現で評価した加工面の間には、輝度対比弁別閾を上回る輝度差があると計算された。したがって、視覚シミュレーションにより、光沢の度合いとその原因となっている微視的な形状の差を説明できると考えられる。
- 4) 旋削加工面の光沢の度合いの差を明確に見出せる撮影条件を輝度分布の計算結果から予測した。撮影で得られた写真データでは、光沢の度合いの差が最も顕著な加工面について同様の傾向が見受けられた。したがって、視覚シミュレーションを用いて様々な照明光および観察の角度での輝度分布を計算することで、光沢の度合いの異なる加工面の外観の差を明確にする撮影セットアップを予測できると考えられる。

- 5) 材質の異なるボールエンドミルを用いて異なる微視的な形状をもつ、光沢の度合いの異なる加工面を用意し、視覚シミュレーションにより光沢の度合いを解析した。計算結果の妥当性を検証するため官能評価をおこなった結果、加工面の輝度の差を明確に認識できると予想された観察セットアップでの官能評価結果と計算結果の傾向が一致した。したがって、視覚シミュレーションと反射輝度分布曲線を用いて加工面の光沢の度合いを解析し、官能評価において外観の差を明確に認識できるような観察方法を予測できると考えられる。
- 6) 形状の勾配と光の波長、照明光および観察の角度から計算されるパラメータ W_x , W_y が光沢の度合いに対応していると考えられる。さらに、特定の光の波長を選択することで光沢の度合いを明確に検出できる可能性が示唆された。
- 7) 虹面の均一さについて、官能評価アンケート調査において「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、視覚シミュレーションを用いて色を計算した。その結果、照明光と観察の角度によって色相が変化する傾向が写真と一致した。また、加工面の異なる位置で測定した形状データで計算した結果、同様の色相の変化がみられた。したがって、視覚シミュレーションを用いて色相を計算することにより虹面の色の均一さを説明できると考えられる。虹面が均一、または不均一と判断される場合の色相の差の閾値については、さらに他の虹面について同様の解析をおこなって調査する必要がある。
- 8) 虹面の鮮やかさについて、反射輝度分布曲線と同様に、様々な方向で観察した場合の色の彩度を計算し観察角度に対してプロットすることで解析した。その結果、観察角度を限定しない場合の官能評価結果とは傾向が一致したが、特定の観察角度での結果とは一致しない場合があった。観察角度によって頻繁に彩度の大小関係が変化する場合には、特定の方向からの色の鮮やかさを説明することが困難な場合もあるが、様々な方向から観察したときの全体的な虹の鮮やかさは説明できると考えられる。
- 9) 巨視的な要因のために生じる切削模様の不均一さについては、カスプ形状のずれがある部分と無い部分の空間的コントラストの計算結果に差がみられた。またガボール変換の結果では、ずれがある部分の計算結果に輝度分布と同様の傾向がみられたが、ずれがある部分と無い部分を比較すると、ガボール変換の結果での高低差の差は、コントラストの差よりも小さかった。ただし、ガボール変換の結果では、ずれがある部分の計算結果のみから不均一さの傾向を検出できた。したがって、ガボール変換の結果を正規化するなどの計算手法を確立すれば、巨視的な要因による切削模様の不均一さを定量的に説明できると考えられる。

- 10) 微視的な要因のために生じる切削模様の不均一さについては、輝度分布に見られた不均一さと同様の傾向がガボール変換の結果にもみられた。したがって、ガボール変換を用いて微視的な要因による切削模様の不均一さを説明できると考えられる。
- 11) 均一、または不均一な切削模様をもつ加工面の差について、空間的コントラストの計算結果と、ガボール変換の結果での高低差を比較した結果、ガボール変換の方に顕著な差がみられた。したがってガボール変換を用いる方法は空間的コントラストを計算する方法に比べ、切削模様の均一さと不均一さの差を検出しやすいと言える。

付録

2.4 節で述べた切削加工面を用いた官能評価アンケート調査で得られたコメントの全文を表 Table A.1~A.15 に示す. 表中で **Positive** の欄にあるコメントは肯定的な判定の理由であり, **Negative** の欄にあるコメントは否定的な判定の理由である. また **Neutral** の欄は, 良否の判定がされなかったサンプルに対するコメントである. コメントはすべて日本語で書かれており, 筆者が英語に訳した.

Table A.1 Comments for sample No. 1

Neutral	悪くない Not bad.
Negative	段付 Steps are visible.
Negative	スジが見える Stripes are visible.
Negative	横スジ多い Many horizontal stripes.

Table A.2 Comments for sample No. 2

Negative	スジが見える Stripes are visible.
Negative	均一じゃない Not uniform.
Negative	横に筋が入ってる Stripes exist in horizontal direction.
Negative	切削マークの間隔が不均一 Intervals of cutter marks are not uniform.
Negative	不規則なこすった (ような感じ?) Irregular. Looks like rubbed?
Negative	スジが見える Stripes are visible.

Table A.3 Comments for sample No. 3

Neutral	タタミ目状になっている Pattern is apparent.
Negative	きもち悪い Not comfortable.
Negative	縦 (?) 線が大きい Thick vertical stripes.

Table A.4 Comments for sample No. 4

Negative	パスがななめに見える Cutting paths look slanted.
Neutral	斜めのスジが見える slanted stripes are visible.
Negative	スジ目と虹光が目立つ Apparent stripes and iridescence.
Negative	ビビリ Chatter vibration.
Negative	ビートぽい Looks like beat vibration.
Negative	びびりっぽい Looks like chatter vibration.
Negative	よれている Looks twisted.
Negative	あらい. ななめにすじ Rough. Slanted stripes.
Negative	斜メ Slated.
Negative	加工時の振動・工具の問題で, うねりのようなものがみえる Something like waviness caused by cutting vibration or tool.
Negative	良いと感じたワークにくらべスジが強く見えました Stripes looks apparent compared to preferable workpieces.
Negative	粗さが悪いだけでなく切削面がななめになっている Not only rough but cutting surface is slanted.
Negative	横線のピッチが大きい気がする Interval of horizontal stripes seems larger.
Negative	波うってる Waviness.
Negative	ななめの線が見える Slanted stripes are visible.

Table A.5 Comments for sample No. 5

Positive	ピックが少々荒いが面は均一 Pick feed is a little large, but surface is uniform.
Positive	均一 Uniform.
Positive	目がそろってる気がする Pattern seems constant.
Positive	すじが均一. 気にならない Stripes are uniform and not annoying.

Table A.6 Comments for sample No. 6

Negative	ビビリ Chatter vibration.
Negative	違う方向 Different direction.
Negative	切削マークの間隔が不均一 Intervals of cutter marks are not uniform.
Negative	ノイジー Noisy.
Negative	ムラがある Not uniform.

Table A.7 Comments for sample No. 7

Negative	ピックのうろこ目が見える Periodic pattern caused by pick feed.
Negative	途中で変わる Surface changes from some area.
Negative	スジが見える Stripes are visible.
Negative	ゆがんでいる 線が入っている Surface looks distorted and has stripes.

Table A.8 Comments for sample No. 8

Negative	不ぞろい Not uniform.
Positive	面が均一 Uniform.
Negative	切削マークの間隔が不均一 Intervals of cutter marks are not uniform.
Positive	最も光を反射して、美しく見えた。 It reflects illumination light most and looks beautiful.
Negative	びびってる Chatter vibration.
Negative	横方向の濃い線が見える Strong stripes in horizontal direction.

Table A.9 Comments for sample No. 9

Negative	まだらに見える Looks mottled.
Negative	スジぼい Many stripes.
Negative	細かいけど虹色 Cutting marks are fine but it looks iridescent.

Table A.10 Comments for sample No. 10

Positive	パスが均一 Cutting path looks uniform.
Neutral	タタミ目状になっている Pattern is apparent.
Positive	(ちょっと不規則なスジ) カスプが細かくツルっとしている (Irregular stripes.) Fine cutter marks and smooth surface.
Positive	一番平均的な切削面でそろっている Most uniform cut surface.
Positive	光の反射にムラがない Uniform light reflection.
Positive	横スジ少 Less horizontal stripes.

Table A.11 Comments for sample No. 11

Positive	面がきれい Nice surface.
Positive	スジが目立たない Stripes are not apparent.
Positive	(ちょっと不規則なスジ) カスパが細かくツルっとしている (Irregular stripes.) Fine cutter marks and smooth surface.
Positive	キソク正しい Regular.
Positive	客先 OK な面 Okay for clients.
Positive	細かさ Fine marks.
Positive	なめらかさ Smooth.
Positive	なめらか均等 Smooth and uniform.

Table A.12 Comments for sample No. 12

Negative	粗い Rough.
Positive	均一 Uniform.
Negative	ピックのうろこ目が見える Cutting marks are visible.
Positive	目がそろってる気がする Seemingly uniform pattern.
Negative	大きい間かくの線が見える Stripes in large interval.
Negative	あらい Rough.

Table A.13 Comments for sample No. 13

Positive	(刃の入りが均一でないけど) 比較的均一. 横も縦も (Even though cutter marks are not uniform) both vertical and horizontal patterns are relatively uniform.
Negative	△ヒラ? Flat cutting?
Positive	(ちょっと不規則なスジ) カスパが細かくツルっとしている (Irregular stripes.) Fine cutter marks and smooth surface.

Table A.14 Comments for sample No. 14

Negative	不ぞろい Not uniform.
Negative	乱雑 Messy.

Table A.15 Comments for sample No. 15

Positive	若干ふぞろいが見られるが面としては良い Nice surface, even though it has a little irregularities.
Positive	光沢がよい Nicely glossy.
Positive	目がそろっている Cutter marks seem uniform.
Positive	虹色に一番みえない Least iridescent.
Positive	均一 Uniform.
Positive	目が細かい Fine cutter marks.
Positive	横線のピッチが小さく、色の発しよくが均等 Interval of horizontal stripes is the smallest, and uniformly iridescent.
Positive	平たく見える Seemingly flat.
Positive	遠目にみたときに目に入ってきた Conspicuous when seen from a distance.
Positive	なめらかさ Smooth.

謝辞

本研究を遂行するにあたり、懇切なる御指導を賜りました京都大学大学院工学研究科マイクロエンジニアリング専攻教授 松原 厚博士に深甚なる謝意を表します。貴重な時間を割いて御助言を頂きました、京都大学大学院工学研究科マイクロエンジニアリング専攻准教授 河野 大輔博士、同技術専門員 山路 伊和夫博士に深く感謝の意を表します。同じく懇切なる御指導を頂きました、京都大学大学院工学研究科マイクロエンジニアリング専攻 特定准教授 Anthony Beaucamp 博士、特定助教 森 幸太郎博士、特定助教 大和 駿太郎博士に心より感謝申し上げます。

加工技術研究所所長 中川 平三郎博士、同志社大学理工学部機械システム工学科教授 廣垣 俊樹博士をはじめとする RMT 研究会および GSX・DBM/CCM 研究会の皆様には、貴重な御助言と御協力を頂きましたことに深く感謝いたします。

加工実験と官能評価アンケート調査につきまして多大なる御支援を頂きました、日進工具株式会社 後藤 隆司氏、岡田 浩一氏、藤井 一二氏、渡辺 健志博士、黒澤 淳一氏、榊原 達也氏に心より感謝申し上げます。

同じく加工実験につきまして多大なる御支援を頂きました、安田工業株式会社 角田 庸人氏、田中 匠太郎氏に心より感謝申し上げます。

加工実験と白色干渉計による形状測定に多大なる御協力を頂きました、大昭和精機株式会社 矢内 正隆氏、上村 孝一氏、船職 彰人氏、仲谷 開人氏に心より感謝申し上げます。

分光放射照度計と分光放射輝度計を用いた実験につきまして多大なる御協力と御助言を頂きました、コニカミノルタジャパン株式会社 中尾 光孝氏、神田 寛氏、黒須 瑞那氏、コニカミノルタ株式会社 北 哲也氏に心より感謝申し上げます。

分光エリプソメータを用いた屈折率測定に御協力を頂きました、京都府中小企業技術センター 松延 剛 氏に心より感謝申し上げます。

レーザ顕微鏡による形状測定につきまして御協力を頂きました、京都大学ナノテクノロジーハブ拠点 永松 奈津子氏に心より感謝申し上げます。

本研究には、一般財団法人 森記念製造技術研究財団の多大なる助成を頂きました。ここに謝意を表します。

最後に、本研究の遂行に御協力を頂きました、京都大学大学院工学研究科マイクロエンジニアリング専攻精密計測加工学研究室の皆様ならびに、同機械理工学専攻機械工作室の皆様にも心より感謝いたします。

参考文献

- [1] ISO 2768-1:1989 General tolerances - Part 1: Tolerances for linear and angular dimensions without individual tolerance indications. 1989.
- [2] ISO 1101:2012 Geometric Product Specifications (GPS) - Geometrical tolerancing - Tolerances of form, orientation, location, and run-out. 2012
- [3] ISO 4287:1997 Geometrical Product Specifications (GPS) - Surface texture: Profile method - Terms, definitions and surface texture parameters. 1997.
- [4] H. Oktem, T. Erzurumlu, and H. Kurtaran. Application of Response Surface Methodology in the Optimization of Cutting Conditions for Surface Roughness. *Journal of Materials Processing Technology*, 2005, 170, pp. 11-16.
- [5] M. Mia, P. R. Dey, M. S. Hossain, M. T. Arafat, M. Asaduzzaman, M. S. Ullah and S. M. Tareq Zobaer. Taguchi S/N Based Optimization of Machining Parameters for Surface Roughness, Tool Wear and Material Removal Rate in Hard Turning under MQL cutting Condition. *Measurement*, 2018, 122, pp. 380-391.
- [6] B. Umroh, Muhathir, and Darianto. The Optimum Cutting Condition when High Speed Turning of Aluminum Alloy Using Uncoated Carbide. *2019 IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2019, 505, pp. 012041.
- [7] S. Yamashita, T. Furuki, H. Kousaka, T. Hirogaki, E. Aoyama, K. Inaba and K. Fujiwara. Investigation of Optimum Grinding Condition Using cBN Electroplated End-Mill for CFRP Machining. *International Journal of Automation Technology*, 2021, 15(1), pp. 4-16.
- [8] ISO25178-73:2019 Geometrical product specifications (GPS) - Surface texture: Areal - Part 73: Terms and definitions for surface defects on material measures. 2019.
- [9] 宅間正則, 柴坂敏郎, 河合正樹, 豊嶋敏雄. 加工状態の評価に基づく切削条件設定システムに関する研究 (第1報) —ファジィ積分と山登り方の適用—. *精密工学会誌*, 1994, 60(2), pp. 255-259.
- [10] 藤本定正, 鮎沢隆, 巢山博美. にじ面の研究. *精密機械*, 1966, 32(6), pp. 409.
- [11] 岩部洋育, 藤田剛. 三次元 CAD を活用したボールエンドミルおよび楕円エンドミル加工における切削機構の解析と切削特性の評価. *精密工学会誌*, 2011, 77(8), pp. 737-741.
- [12] 岩部洋育, 菊池恭平, 白井健司. ラジラスエンドミルによる加工面の理論粗さの解析 (傾斜面の等高線および走査線加工法における幾何学的解析と検証実験). *日本機械学会論文集*, 2015, 81(832), pp. 15-00289.
- [13] H. Paris, G. Peigne and R. Mayer. Surface Shape Prediction in High Speed Milling. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 2004, 44(15), pp. 1567-1576.

- [14] 尾崎信利, 松井翔太, 廣垣俊樹, 青山栄一. エンドミルびびり加工面模様の二次元離散フーリエ変換を用いた画像処理に基づく状態推定方法の検討. 日本機械学会論文集, 2019, 85(879), pp. 19-00292.
- [15] B. Denkena, A. Krödel, A. Mücke and L. Ellersiek. Prediction of Plastic Surface Defects for 5-axis Ball End Milling of Ti-6Al-4 V with Rounded Cutting Edges Using a Aterial Removal Simulation. CIRP Annals, 2021, 70(1), pp. 91-94.
- [16] 會田俊夫, 井川直哉, 岩田一明, 岡村健二郎, 中島利勝, 星鐵太郎. 切削工学. コロナ社, 東京, 1973.
- [17] N. Ruttinmann, S. Buhl, K. Wegener. Simulation of Single Grain Cutting Using SPH Method. Journal of Machine Engineering, 2010, 10(3), pp. 17-29.
- [18] M. Madaj and M. Piška. On the SPH Orthogonal Cutting Simulation of A2024-T351 Alloy. Procedia CIRP, 2013, 8, pp. 152-157.
- [19] K. Miura. Point Autofocus Instrument. in Optical Measurement of Surface Topography, R. Leach (Ed.), Springer, 2011.
- [20] R. Artigas. Imaging Confocal Microscopy in Optical Measurement of Surface Topography, R. Leach (Ed.), Springer, 2011.
- [21] P. de Groot. Phase Shifting Interferometry. in Optical Measurement of Surface Topography, R. Leach (Ed.), Springer, 2011.
- [22] ISO 25178-2:2012 Geometrical product specifications (GPS) - Surface texture: Areal - Part 2: Terms, definitions and surface texture parameters. 2012.
- [23] F. Pernkopf and P O'Leary. Visual Inspection of Machined Metallic High-precision Surfaces. EURASIP Journal on Advances in Signal Processing, 2002, 7, pp. 667-678.
- [24] S. Satorres Martinez, C. Ortega Vazquez, J. Gamez Garcia and J. Comez Ortega. Quality Inspection of Machined Metal Parts Using an Image Fusion Technique. Measurement, 2017, 111, pp. 374-383.
- [25] S. Chen, B. Lin, X. Han and X. Liang. Automated Inspection of Engineering Ceramic Grinding Surface Damage Based on Image Recognition. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2013, 66, pp. 431-443.
- [26] 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), 1998, 64(620), pp. 1104-1112.
- [27] X. Li, L. Wang and N. Cai. Machine-vision-based Surface Finish Inspection for Cutting Tool Replacement in Production. International Journal of Production Research, 2007, 42(11), pp. 2279-2287.
- [28] 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, 2005, 55(1), pp. 15-19.

- [29] 米原牧子, 木原幸一郎, 磯野宏秋, 杉林俊雄, 井形直弘. 純チタンおよび TiN コーティング面の光沢度と表面色に及ぼす表面粗さの影響. 軽金属, 2005, 55(12), pp. 668-672.
- [30] 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, 2016, 82(11), pp. 944.
- [31] 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, 2017, 83(3), pp. 204.
- [32] 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, 東京, 2015.
- [33] P. Beckmann and A. Spizzichino. The Scattering of Electromagnetic Waves from Rough Surfaces. Artech House, Inc., Norwood, MA, 1987.
- [34] 鵜飼一彦, 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, 東京, 2007.
- [35] Mads00. File:Neural pathway diagram.svg.
https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Neural_pathway_diagram.svg, 2016. 最終アクセス日 : 2022 年 1 月 25 日.
- [36] Holly Fischer. File:Three Main Layers of the Eye.png.
https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Three_Main_Layers_of_the_Eye.png, 2013. 最終アクセス日 : 2022 年 1 月 25 日.
- [37] D. R. Williams. Topography of the Foveal Cone Mosaic in the Living Human Eye. Vision Research, 1988, 28(3), pp. 433-454.
- [38] 大田登. 色彩工学 第 2 版. 東京電機大学出版局, 東京, 2001.
- [39] H. Hofer, J. Carroll, J. Neitz, M. Neitz and D. R. Williams. Organization of the Human Trichromatic Cone Mosaic. The Journal of Neuroscience. 2005, 25(42), pp. 9669-9679.
- [40] CIE. 2 degree spectral luminous efficiency function for photopic vision. CIE Publishing, Vienna, 1990, No. 086.
- [41] 武内徹二. 明るさの知覚. 照明学会誌, 1997, 81(6), pp. 493-499.
- [42] CIE. Colorimetry, 4th ed. CIE Publishing, Vienna, 2018, No. 015.
- [43] D. L. MacAdam. Visual Sensitivities to Color Differences in Daylight. Journal of the Optical Society of America, 1942, 32(5), pp. 247-274.
- [44] 城一夫 編. 徹底図解 色のしくみ. 新星出版社, 東京, 2018.
- [45] 向川康博. 反射・散乱の計測とモデル化. 研究報告コンピュータビジョンとイメージメディア, 2010, 2010-CVIM-172(34), pp. 1-11.
- [46] B. T. Phong. Illumination for Computer Generated Pictures. Communications of the ACM, 1975, 18(6), pp. 311-317.

- [47] R. L. Cook, and K. E. Torrance. A Reflectance Model for Computer Graphics. ACM SIGGRAPH Computer Graphics, 1981, 15(3), pp. 307-316.
- [48] K. E. Torrance and E. M. Sparrow. Theory for Off-specular Reflection from Roughened Surfaces. Journal of the Optical Society of America, 1967, 57(9), pp.1105-1114.
- [49] G. J. Ward. Measuring and Modeling Anisotropic Reflection. Proceedings of the 19th annual conference on Computer graphics and interactive techniques. 1992, pp. 265-272.
- [50] E. Hecht. Optics, 5th ed. Pearson Education Ltd., Harlow, Essex, 2017.
- [51] 小館香椎子, 神谷武志 監修. 回折光学素子の数値解析とその応用. 丸善出版, 東京, 2011.
- [52] 中西弘樹, 篠崎充, 水谷康弘, 高谷裕浩. タルボット効果による多重露光リソグラフィを用いた3次元ナノ周期構造の作製. 精密工学会誌, 2019, 85(8), pp. 710-716.
- [53] 谷田貝豊彦. 光学. 朝倉書店, 東京, 2017.
- [54] IEC 61966-2-1 Multimedia systems and equipment - Colour measurement and management - Part 2-1: Colour management - Default RGB colour space - sRGB. 1999.
- [55] A.C. Chadwick and R. W. Kentridge. The Perception of Gloss: A Review. Vision Research, 2015, 109, pp. 221-235.
- [56] ISO2813:2014 Paints and varnishes - Determination of gloss value at 20 degrees, 60 degrees and 85 degrees. 2014.
- [57] I. Motoyoshi, S. Nishida, L. Sharan and E. Adelson. Image Statistics and the Perception of Surface Qualities. Nature letters, 2007, 447, pp.206-209.
- [58] 蓮沼宏. 光沢. コロナ社, 東京, 1960.
- [59] CIE. An analytic model for describing the influence of lighting parameters upon visual performance, 2nd ed. Vol.1, CIE Publishing, Vienna, 1981, No.19.21.
- [60] F. Cheng, Ping-Hsiang Su, J. Choi, S. Gwo, X. Li and Chih-Kang Shih. Epitaxial Growth of Atomically Smooth Aluminum on Silicon and Its Intrinsic Optical Properties. ACS Nano, 2016, 10, pp. 9852-9860.
- [61] Y. Sato, T. Nakanishi, R. Sato, K. Shirase, M. Oda and N. Nakayama. Study on the Evaluation Method for Finished Surface Based on Human Visual Characteristic. Proceedings of ISFA2016- 2016 International Symposium on Flexible Automation, Cleveland, OH, 2016, pp. 428-431.
- [62] 藤本定正. 精密旋削面の虹むら. 精密機械, 1975, 41(491), pp. 1117-1121.
- [63] 藤本定正. 虹面の種類に及ぼす表面の微細形状の影響. 精密機械, 1971, 37(3), pp.184-189.
- [64] 佐伯昌彦, 井村誠孝, 安室喜弘, 眞鍋佳嗣, 千原國宏. 光路差に着目した汎用的な構造色レンダリング手法. 映像情報メディア学会誌, 2006, 60(10), pp. 1593-1598.

- [65] M. A. Steindorfer, V. Schmidt, M. Beleggratis, B. Stadlober and J. R. Krenn. Detailed Simulation of Structural Color Generation Inspired by the Morpho Butterfly. *Optics Express*, 2012, 20, pp. 21485-21494.
- [66] 齋藤明德, 趙曉明, 堤正臣. ボールエンドミル加工における仕上げ面凹凸模様の制御方法. *精密工学会誌*, 2000, 66(3), pp. 419-423.
- [67] 齋藤明德, 趙曉明, 堤正臣. ボールエンドミル加工における曲面上への凹凸模様の形成方法. *精密工学会誌*, 2000, 66(12), pp. 1963-1967.
- [68] 樋口達雄, 川又政征. MATLAB 対応デジタル信号処理. 森北出版, 東京, 2015.
- [69] 吉田靖夫, 山本鎮男, 中野宏毅. ウェーブレットによる信号処理と画像処理. 共立出版, 東京, 1999.
- [70] 金子博. フラクタル特徴とテクスチャ解析. *電子情報通信学会論文誌 D*, 1987, J70-D(5), pp. 964-972.
- [71] T. M. Abhishree, J. Latha, K. Manikantan and S. Ramachandran. Face Recognition Using Gabor Filter Based Feature Extraction with Anisotropic Diffusion as a Pre-processing Technique. *Procedia Computer Science*, 2015, 45, pp. 312-321.
- [72] 吉川るり葉, 寺本篤司, 松原友子, 藤田広志. 複数のガボールフィルタを用いた乳房 X 線画像における乳腺構造解析と構築の乱れの検出. *Medical Imaging Technology*, 2012, 30(5), pp. 287-292.
- [73] S. J. Anderson and D. C. Burr. Respective Field Properties of Human Motion Detector Units Inferred from Spatial Frequency Masking. *Vision Research*, 1989, 29(10), pp. 1343-1358.
- [74] R. L. De Valois, H. Morgan and D. Ma Snodderly. Psychophysical Studies of Monkey Vision-III. Spatial Luminance Contrast Sensitivity Tests of Macaque and Human Observers. *Vision Research*, 1974, 14(1), pp. 75-81.

論文リスト

学術雑誌

- [1] M. Ihara, A. Matsubara and A. Beaucamp. Study on Removal Mechanism at the Tool Rotational Center in Bonnet Polishing of Glass. *Wear*, 2020, 454-455, pp. 203321.
- [2] 井原基博, 山路伊和夫, 藤井一二, 渡辺健志, 矢内正隆, 松原厚. 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. *精密工学会誌*, 2021, 87(11), pp. 894-902.
- [3] M. Ihara, I. Yamaji, A. Matsubara. Quantitative Evaluation of Machined-surface Gloss Using Visual Simulation and its Application to Sensory Test. *International Journal of Automation Technology*, 2022, 16(2), in press.

国際会議

- [4] M. Ihara, A. Beaucamp and A. Matsubara. Experimental Investigation on Removal Mechanism at Tool Rotational Center in Glass Polishing. *ASPEN2019 - 8th International Conference of Asian Society for Precision Engineering and Nanotechnology*, Matsue, Japan, 2019.
- [5] M. Ihara, I. Yamaji and A. Matsubara. On Classification and Quantification of Sensory Parameters in Judging Mirror Surface: Appearance of a Turned Aluminum Alloy Surface. *ISFA2020 - 2020 International Symposium on Flexible Automation*, Online, Virtual, 2020.
- [6] M. Ihara, I. Yamaji, K. Fujii, T. Watanabe, M. Yauchi and A. Matsubara. Visual Simulation Method for Classification and Quantification of Sensory Parameters in Judging Mirror Surface. *ICPE2020 - 18th International Conference on Precision Engineering*, Online, Virtual, 2020.

国内会議

- [7] 井原基博, Anthony Beaucamp, 松原厚. CNC 研磨加工機のためのサーボチューニング法と加工シミュレーション. 2017年度精密工学会秋季大会学術講演会, 大阪, 2017.
- [8] 井原基博, Anthony Beaucamp, 松原厚. 研磨加工における工具周速ゼロ点近傍での加工のモデル化に関する研究. 日本機械学会関西支部第93期定時総会講演会, 大阪, 2018.

- [9] 井原基博, Anthony Beaucamp. 研磨加工における工具周速ゼロ点近傍での加工のモデル化に関する研究—スラリーの観察実験—. 2018 年度精密工学会秋季大会学術講演会, 函館, 2018.
- [10] 井原基博. 切削加工面の評価方法—A2017 旋削面の外観—. 日本機械学会関西支部 第 20 回秋季技術交流フォーラム 設計製図教育研究懇話会, 大阪, 2019.
- [11] 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, 東京, 2020.
- [12] 井原基博, 山路伊和夫, 松原厚. 視覚シミュレーションを用いた機械加工面の光沢の定量的評価. 第 22 回 計測自動制御学会システムインテグレーション部門講演会, オンライン, 2021.