

カラーイメージングによる表面粗さ推定（第2報）

－ 品質工学のパラメータ設計手法による測定系の最適化 －

光科 中野雅晴

Surface roughness estimation using color imaging (2nd Report)

－ Optimization of a measurement system by using a parameter design method in quality engineering －

NAKANO Masaharu

It is difficult to control quality quantitatively using sensory tests such as visual inspection and palpation, which have been used as methods for evaluating surface roughness. In this study, a method to image and measure the color of the sample surface with high accuracy using a two-dimensional colorimeter, and to quantitatively estimate the macroscopic difference in surface roughness from the colorimetric value distribution has been developed. This paper investigates factors that affect the colorimetric value distribution by using a parameter design method of quality engineering, and shows the result of optimizing the measurement system so that the measurement variation is small even in noisy situations. The surface roughness and the width of the colorimetric value distribution were set to input and output, respectively, and the parameter design of dynamic characteristics was performed. The distribution of colorimetric values changed depending on factors such as the color of the light source, the type of imaging lens, and how lighting was applied to the sample. In addition, by optimizing the parameters of these factors, it was confirmed that it was possible to improve both S/N ratio and sensitivity by up to 7 db.

Keywords : Surface roughness, colorimetry, imaging, colorimeter, quality engineering

表面粗さの評価法として使われてきた目視や触診等の官能検査は、定量的な品質管理が難しいことが課題である。本研究では、二次元色彩計を使って試料表面の色を高精度にイメージング測定し、その測色値分布から表面粗さの巨視的な違いを定量的に推定する方法を開発した。本報告では、品質工学のパラメータ設計手法を用いて、測色値分布に影響を与える因子を調べ、ノイズがある状況でも測定ばらつきが小さくなるように測定系を最適化した結果を示す。入力を表面粗さ、出力を色彩計で測定した測色値分布の拡がり幅として、動特性のパラメータ設計を行った。光源の色、撮像レンズの種類、試料に対する照明の当て方等の因子により測色値分布が変わることがわかった。また、これら因子のパラメータを最適化することで、SN比と感度を共に最大で7db改善できることを確認した。

キーワード：表面粗さ、測色、イメージング、色彩計、品質工学

1 はじめに

表面粗さは、加工後の表面性状を評価する指標として利用されている。特に、表面粗さによって性能が大きく変わってしまうような製品では、定量的な測定が望まれる。

表面粗さを評価する方法として、目視や触診といった官能検査が広く使われてきた。官能検査は、形状が複雑な面でも短時間で評価できる等の利点があ

る反面、専門技術を有する熟練の検査員が必要で、同一基準での定量的な評価が難しい。一方、面の粗さを機械的に定量測定する方法として、共焦点顕微鏡や光干渉計による三次元形状計測が使われている。これらの形状計測は、微細領域における表面粗さを正確に測定することができる。しかし、顕微計測であるため1回に測定できる面積が狭く、広い面積を短時間で測定する必要がある製品検査等の用途には

向いていない。

そこで、我々は、試料表面の色を2次元色彩計で高精度にイメージング測定することで、巨視的な表面粗さの違いを短時間で定量的に測定する方法の確立を目指してきた¹⁾。本方法では、イメージング測定した各画素の測色値を色表現で用いるxy色度図上にマッピングし、測色値の分布（以下、色分布）の拡がり幅を測定する。予め表面粗さと色分布の拡がり幅との関係が分かっているならば、測定した拡がり幅から表面粗さを推定できる。これまでに、高さ方向の粗さパラメータであるSa（輪郭曲面の算術平均高さ）と色分布の拡がり幅との関係は、指数関数で近似でき、Sa=0.3μm～47μmの範囲で表面粗さを推定できることを示した。

本報告では、ノイズがある状況でも安定的かつ高感度な測定を実現するために、品質工学のパラメータ設計手法²⁾を用いて色彩測定に影響を与える因子を調べ、測定系を最適化した結果について示す。

2 方法

2.1 カラーイメージングによる表面粗さ推定

図1に、2次元色彩計を用いたカラーイメージングによる表面粗さ推定の方法について概略図を示す。試料に対して斜めから照明し、垂直方向に拡散反射した光を2次元色彩計CA-2000（ユニカミノルタ製）で測定した。次に、色彩計で測定した試料表面像において、各画素の測色値（XYZ表色系）をxy色度図にマッピングした。xy色度図では色の違いを異なる座標として表現する。実際に表面粗さが異なる試料の測色値を比較したところ、xy色度図において色分布の拡がり幅に違いが生じた。この現象を利用して測

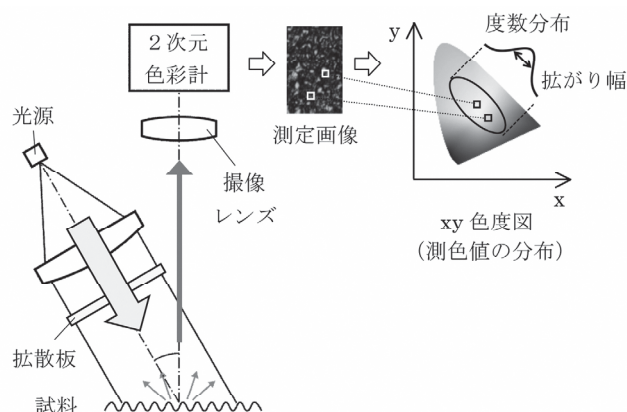


図1 カラーイメージングによる表面粗さ推定の概念図

色値から表面粗さを推定することを試みた。試料表面像の色分布において、分散が最も大きい方向の拡がり幅（標準偏差）を粗さ比較の指標とした。

2.2 パラメータ設計

品質工学における動特性のパラメータ設計手法³⁾を用いて、色分布の拡がり幅に影響を与える因子を調べた。図2に、表面粗さと色分布の拡がり幅との関係を示す。試料は、表面粗さが異なる12種類の表面形状を有する放電加工で作製した粗さ比較見本板KB013（Rubert社製）を用いた。材質はニッケルである。粗さパラメータのSaは共焦点顕微鏡で測定した¹⁾。各試料面のSaは0.3μmから47μmの範囲の値をとった。動特性の評価では、入出力関係が線形である必要がある。しかし、図2(a)のように、表面粗さの増加に対して色分布の拡がり幅は非線形に増加する。ただし、図2(a)のSa=0.6μm～6.2μmの範囲（灰色部）を抽出した図2(b)を見ると、この範囲では両者は線形関係とみなすことができる。そこで、信号因子（入力）をSa=6.2μm以下の表面粗さ（6水準）とした。特性値（出力）は、回帰直線が原点を通るように、y軸切片を減算した色分布の拡がり幅とした。

表1に誤差因子を示す。因子として測定環境の明るさと、撮像レンズの収差、および照明むらを取り上げた。照明光源以外に室内灯で試料が照らされると色分布が変わりノイズとなる。また、評価領域が視野中心から離れると、レンズの収差や照明むらにより特性値が低下する。これらの誤差因子の影響を受けずに、ばらつきが少ない安定した測定を行えることが理

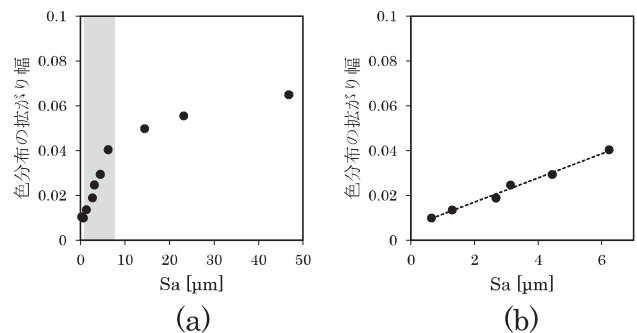


図2 表面粗さと色分布拡がり幅の関係
(a) Sa=0.3μm～47μm、(b) Sa=0.6μm～6.2μm

表1 誤差因子

誤差因子	水準 N ₁	水準 N ₂
測定環境	暗室	室内灯下
評価領域の中心座標[mm]	(0, 0)	(25, 0)

表2 制御因子

制御因子	水準1	水準2	水準3
A 光源	白LED	ハロゲン	—
B 積算回数	4	16	64
C レンズ	広角	標準	望遠
・焦点距離 [mm]	8	16	50
・絞り値	1.4	1.4	2.8
D 撮像角度 [°]	0	5	10
E 拡散板 [°]	なし	20	30
F 照明角度 [°]	30	40	50
G 照度	低	中	高

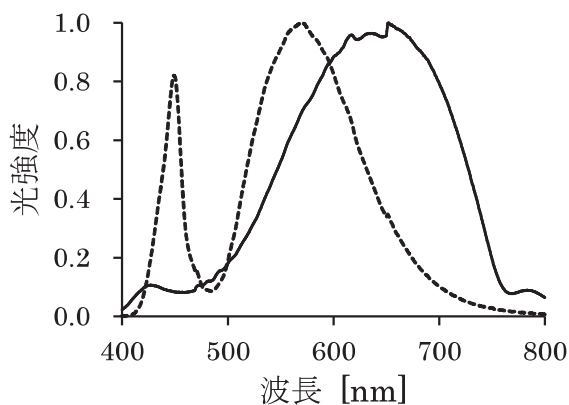


図3 光源の分光スペクトル

点線: 白色LED、実線: ハロゲン光源。光強度は最大値で正規化した値

想である。水準N₁を最良条件、水準N₂を最悪条件とした。パラメータ設計ではこれら2条件における測定値の差が小さくなるように制御因子の水準を最適化する。

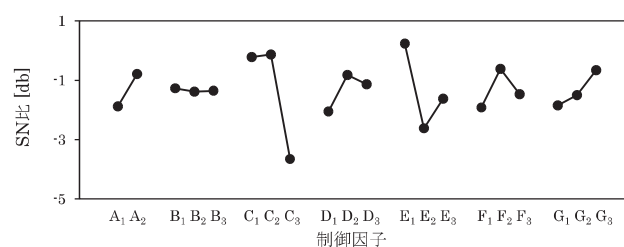
表2に制御因子を示す。A：光源は白色のLEDとハロゲン光源を比較した。図3に各光源の分光スペクトルを示す。ハロゲン光源の方が、青色成分が少なく赤味が強い。B：積算回数は色彩計で測色した値の平均化回数である。C：撮像レンズは、焦点距離と絞り値が異なる3種類を比較した。レンズの種類が変わっても色彩計で測定する視野（180mm角）が同じになるように、試料と色彩計の距離を調整した。評価領域は、表1に示した視野座標を中心とする縦8.8mm×横4.4mmとした。この評価領域は、測定系の要因によって決められた大きさではなく、試料面の大きさにより制約されたものである。D：撮像角度とF：照明角度は、入射面における試料面の法線方向からの角度である。撮像角度は照明から離れる方向を正とした。E：拡散板は、拡散角が20°と30°のレンズ拡散板（楕円光学ソリューションズ製）をレンズでコリメートした照明光の後ろに配置した。G：照

度は、試料表面での値であり、視野中心で測定した。これら7つの制御因子をL₁₈直交表に割り付けて実験した。

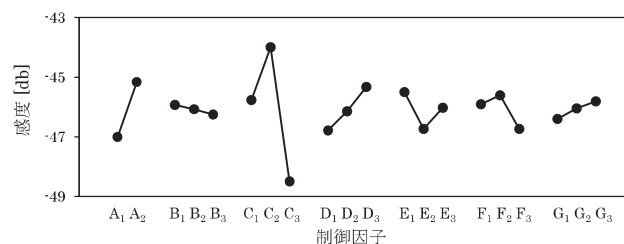
3 結果および考察

3.1 動特性解析

直交表の実験を行いSN比と感度を計算した。図4に、要因効果図を示す。SN比が高いことは、想定したノイズがあってもばらつきが少なく安定して測定できることを意味する。感度は、表面粗さの増加に対して色分布が大きく拡がることを理想とするため、高い方がよい。A：光源はハロゲン光源の方が良いことがわかった。B：積算回数を増やして測定ノイズを小さくしても効果がなかった。つまり、積算回数を減らして測定時間を短くすることができる。C：撮像レンズの種類は、SN比と感度に大きく影響した。各レンズは焦点距離と絞り値に違いがある。このうち、絞り値が小さくなると測定画像の解像感が増し、感度が向上することを実験で確認している⁴⁾。そして、E：拡散板を使って拡散光を照明するより平行光で照明した方が、SN比が高かった。D：撮像角度とF：照明角度は適切な角度が存在し、それぞれ5°と40°でSN比が高かった。照明光のG：照度は明るい方が、SN比が高くなったが、感度については顕著な改善が見られなかった。この解析結果から、制御因子の最適条件をA₂B₁C₂D₂E₁F₂G₂とした。



(a)



(b)

図4 動特性解析により得た要因効果図

(a) SN比、(b) 感度

3.2 再現性評価実験

選んだ制御因子の組み合わせ条件において、推定したSN比と感度の再現性を評価するために確認実験を行った。確認実験では、最適条件と比較するための条件を選択し、各条件の差分である利得について推定値と実験値に大きな差がないかを評価する。比較条件はSN比と感度が低いA₁B₁C₃D₁E₂F₁G₂とした。

表3に、SN比と感度の解析結果から推定した利得と、確認実験で得られた利得を比較した結果を示す。推定値と実験値の差は±3 dbの範囲内であり、再現性があると言える。この差が生じた理由は、制御因子間の交互作用にあると推察する。最適条件では、比較条件と比べてSN比が6.99 db、感度が7.31 db改善した。

図5に、最適条件と比較条件で構成した測定系に

表3 再現性評価実験の結果

	SN比 [db]		感度 [db]	
	推定値	実験値	推定値	実験値
最適条件	3.12	3.02	-41.87	-41.87
比較条件	-6.88	-3.97	-50.38	-49.18
利得	9.99	6.99	8.51	7.31

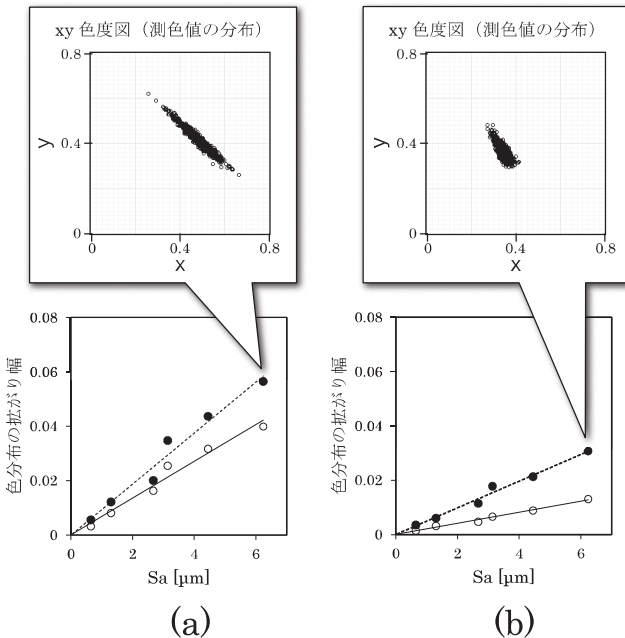


図5 確認実験で測定した表面粗さと色分布拡がり幅の関係

(a) 最適条件、(b) 比較条件、

●: 誤差因子の水準N₁, ○: 誤差因子の水準N₂
 xy色度図は、Sa=6.2μmのときの各条件における水準N₁での色分布

における表面粗さと色分布拡がり幅の関係を示す。最適条件の方が、表面粗さに対して色分布の拡がり幅が大きく変化しており、比較条件とはxy色度図の色分布の形も大きく異なることがわかった。また、比較条件では、表1に示した誤差因子の影響により2水準間(N₁とN₂)で直線の傾きが2.5倍変化しているのに対して、最適条件では1.4倍であり、傾きの変化が小さい。表面粗さと色分布拡がり幅の関係は検量線として用いるため、誤差因子の影響を受けにくい最適条件の方が有益である。

4 まとめ

2次元色彩計で測定した試料の測色値分布から表面粗さを推定する測定系において、品質工学のパラメータ設計手法を用いて、測定ばらつきが小さくなるように制御因子の水準を最適化した。また、色分布の拡がり幅に影響を与える制御因子を調べた。

- (1)制御因子の組合せによって、xy色度図上の測色値分布の形が大きく異なった。
- (2)制御因子のうち、光源は白色LEDよりハロゲン光源の方が良いことがわかった。撮像レンズの種類は、SN比と感度に大きな影響を与えた。また、拡散光より平行光で照明した方が、SN比が高かった。
- (3)解析したSN比と感度を考慮して選定した最適条件と比較条件について確認実験を行った結果、再現性があることが認められた。Sa=0.6μm～6.2μmの粗さ範囲では、制御因子の水準を最適化することによりSN比と感度を共に最大7db程度改善できることがわかった。

本方法により、自動車等で使われる大型部品についても表面粗さの定量的な品質検査を自動化できれば、生産性の向上に寄与できる。

謝辞

本研究は、JSPS科研費 JP20K04221の助成を受けて行いました。

参考文献

- 1) 中野雅晴：カラーイメージングによる表面粗さ推定。静岡県工業技術研究所研究報告，第14号，97-102 (2021)。
- 2) 矢野耕也：品質工学の基礎とパラメータ設計。

【報告】

- 精密工学会誌, 81(11), 1008-1012 (2015).
- 3) 越水重臣 他：バーチャル実験で体得する実践・品質工学, 初版 (榊日刊工業新聞社, 東京), pp.35-49 (2007).
- 4) 中野雅晴 他：カラーイメージングによる表面粗さ推定に関する研究 (第2報). 2022年度精密工学会春季大会学術講演会講演論文集, p.304-305, オンライン (2022).