

カラーイメージングによる表面粗さ推定（第3報）

— 粗さ推定精度の評価 —

光科 中野雅晴
株式会社パラボ 岡田 楓 加藤 誠

Surface roughness estimation using color imaging (3rd Report)

- Evaluation of roughness estimation accuracy -

NAKANO Masaharu, OKADA Kaede and KATOH Makoto

A method to quantitatively measure macroscopic differences in surface roughness in a short period of time based on the color distribution of the sample surface measured by a camera has been developed. A two-dimensional colorimeter, which can accurately measure color, was used for the camera. The colorimetric values of the sample surface measured by the colorimeter were mapped to an x-y chromaticity diagram, and the relationship between the spread of the distribution and the surface roughness was evaluated to create a calibration curve. The estimation accuracy of the surface roughness was estimated from the slope of the calibration curve and the amount of variation in color measurement. It was confirmed that the arithmetic average height S_a , which was a type of roughness parameter, was estimated with an accuracy of $\pm 0.91 \mu\text{m}$. In addition, it was found that the estimation accuracy is affected by the pixel resolution of the image measured by the colorimeter, the color of the illumination light source, and the size of the area where the surface roughness is evaluated.

keywords : Surface roughness, colorimetry, imaging, colorimeter

カメラで測定した試料表面の色の分布から、表面粗さの巨視的な違いを短時間で定量的に測定する方法を開発した。カメラには、色を正確に測定することができる2次元色彩計を用いた。色彩計で測定した試料表面の測色値をxy色度図にマッピングし、その分布の拡がり幅と表面粗さとの関係を評価して検量線を作成した。両者の関係を近似した回帰直線の傾きと、色測定のばらつき量から表面粗さの推定精度を見積もった。粗さパラメータの一種である算術平均高さ S_a を $\pm 0.91 \mu\text{m}$ の精度で推定できることを確認した。また、推定精度は、色彩計で測定した画像の画素分解能と、照明光源の色、および表面粗さを評価する領域の面積に影響されることがわかつた。

キーワード：表面粗さ、測色、イメージング、色彩計

1はじめに

製品の品質検査工程において、加工面の表面粗さを評価するために、目視や触診といった官能検査が使われてきた。官能検査では、高度な検査技術を有する人材が必要で、定量的な品質管理が難しいことが課題となっている。一方、面の表面粗さを定量測定するために、近年では、共焦点顕微鏡や光干渉計を使った三次元形狀計測が用いられている。これらの機器では、微細領域の表面粗さを正確に測定することができる。しかし、顕微計

測のため一度に測定できる面積が狭く（50倍対物レンズで測定した場合、 0.3mm角程度 ）、広い領域を短時間で測定する必要がある製品検査等の用途には適さない。

そこで、我々は、試料表面の色をカメラでイメージング（2次元測定）することで、広い領域において巨視的な表面粗さの違いを短時間で定量的に評価する方法の基礎を確立した^{1,2)}。本方法では、カメラで2次元測定した試料表面の測色値が、表面の凹凸状態によって変わることを利用することを利用する。予

め測色値と表面粗さとの関係を調べておき、測定した試料表面の色から検量線を使い表面粗さを推定する。本報告では、作成した検量線と測色値の差分から表面粗さの推定精度を見積もった結果について示す。

2 方法

2.1 測色による表面粗さ推定

図1に、測色による表面粗さ推定の方法について概略図を示す。試料面の法線に対し斜め方向から平行光で試料を照明し、拡散反射した試料表面の色をカメラで2次元測定した。カメラには、15fpsの速度で正確に色を測定できる2次元色彩計RC-300(株パパラボ製)を用いた。次に、色彩計で測定した画像における各画素の測色値(XYZ表色系)を色表現で用いるxy色度図にマッピングして、その分布(以下、色分布)の拡がり幅と表面粗さの相関を評価した。一般的なカメラと同様に、2次元色彩計でも受光量の減少に従いSN比が低下し、結果として測色値のばらつきが増加した³⁾。また、表面粗さが大きいほど、表面形状は複雑化し測定画像の輝度分布が拡がる傾向にあった。このことから、2次元色彩計の測定では、表面粗さに起因する輝度分布の違いが色分布の違いとなって現れた。輝度分布と比べて色分布の方が、情報量が多いため、表面粗さ推定において優位であると思われる。拡がり幅は、色分布の分散が最大となる方向の幅(標準偏差)とした。

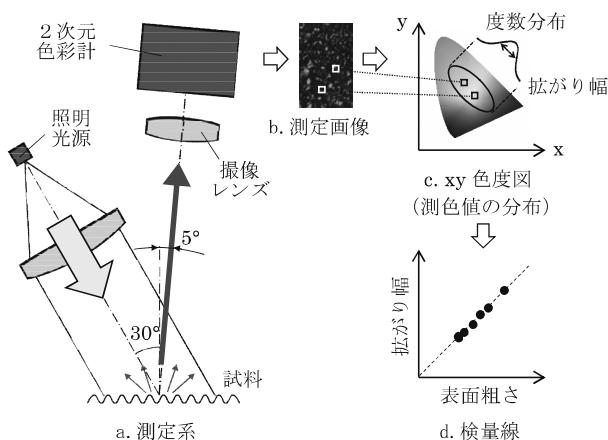


図1 測色による表面粗さ推定の概略図

2.2 表面粗さの推定精度評価

試料として、表面をブラスト処理した、表面粗さが異なる10個のアルミ平板(幅19mm×長さ76mm×厚さ10mm)を用いた。図2に、一部の試料における表面の共焦点顕微鏡像を示す。共焦点顕微鏡OPTELICS HYBRID L7(レーザーテック株製)で測定した三次元形状から、粗さパラメータの一種である算術平均高さSaを算出した。10個の試料は、Saが異なり0.7μm～11.1μmであった。

次に、色彩計の視野中心で測定した色分布の拡がり幅と表面粗さの関係を評価し、回帰直線を求めた。また、視野中心から離れた位置でも同様に色分布を測定し、拡がり幅について回帰直線からの偏差量を測定ばらつきとして2乗平均平方根誤差RMSEで評価した。さらに、色彩計で測定した画像の画素分解能、照明光源の色、および評価領域の面積といった要因が、回帰直線の傾きと拡がり幅のばらつきに与える影響も検討した。また、回帰直線の傾きと拡がり幅のRMSE値の比から表面粗さの推定精度を見積もった。

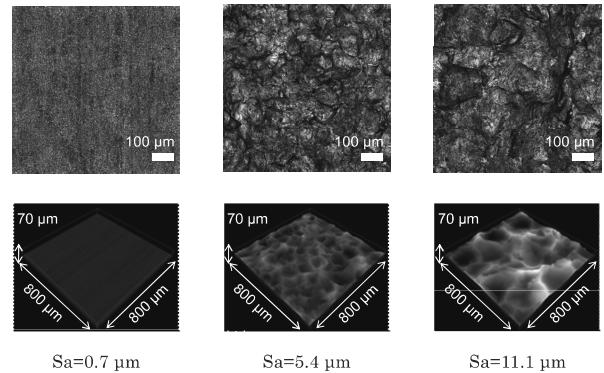


図2 共焦点顕微鏡で測定した試料表面
上：輝度画像、下：表面形状

3 結果および考察

3.1 視野内の測定ばらつき

図3に、図2に示した試料表面の色分布を測定した結果を示す。表面粗さが増加するとxy色度図の色分布が拡大した。図4に、色彩計の視野中心で測定した色分布の拡がり幅と表面粗さSaの関係を示す。色彩計で測定した画像の画素分解能は0.1mm/pxとした。このとき、色彩計の視野は205

mm×154mmであった。Saが増加すると色分布が拡がり、その拡がり幅とSaには $Sa=0.7\text{ }\mu\text{m}\sim11\text{ }\mu\text{m}$ の範囲で線形関係が認められた。両者に線形関係が見られるSaの範囲は、画素分解能に依存することが確認された²⁾。画素分解能を粗くすれば、Saが $11\text{ }\mu\text{m}$ より大きな表面粗さも推定できる可能性がある。

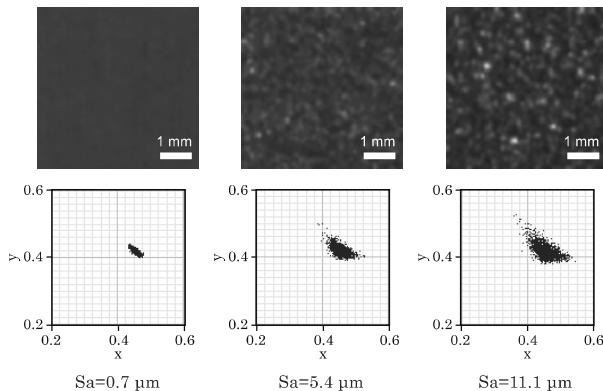


図3 各試料における測色結果
上：色彩計で測定した試料表面の画像、
下：測色値の分布（xy色度図）

次に、図4の下図に示すように、評価領域を視野中心から横方向に移動させながら同様な測定を行い、回帰直線を求めた。移動量が試料サイズよりも大きい場合は、試料を固定した状態で、撮像レンズと色彩計を平行移動させた。周辺視野における色分布の拡がり幅と表面粗さSaとの関係を、図4に併記する。色分布の拡がり幅は視野中心より狭くなり、Saの増加に伴いその差が増加した。

図5に視野中心からの距離と回帰直線の傾きの関係を示す。表面粗さとの関係を表す回帰直線の傾きは、視野中心から30mm以上離れると減少する傾向がみられた。これは、撮像レンズの収差に起因し、周辺視野では十分なレンズ性能が得られなかつたためだと推察される。これらの結果から、本報告では、回帰直線の傾きが一定であった、視野中心から±30mm以内における色分布のばらつき量から表面粗さの推定精度を算出することとした。

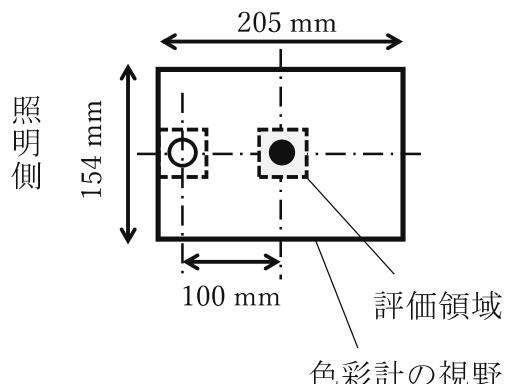
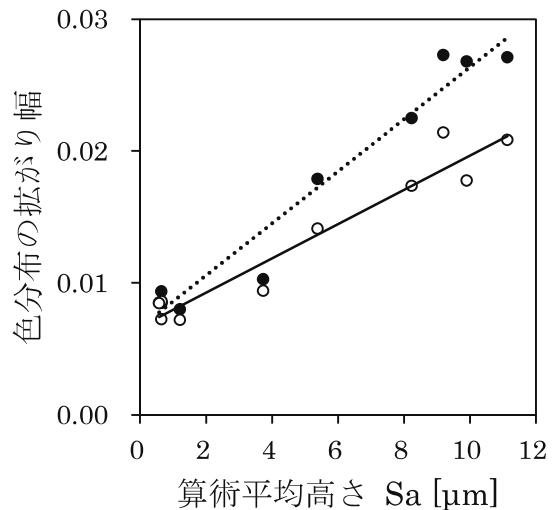


図4 表面粗さSaと色分布の拡がり幅の関係
(測定位置による違い)

●：視野中心、○：周辺視野（視野中心から照明側に100mm離れた位置）で測定、光源はハロゲン光源。

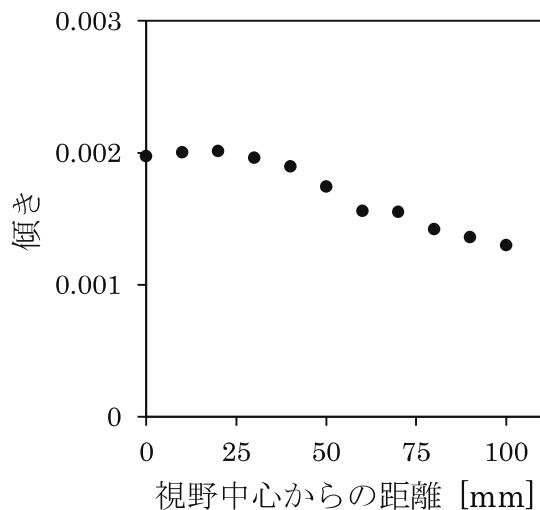


図5 測定位置と回帰直線の傾きの関係

3.2 測定画像の画素分解能の違い

図6に、色彩計で測定した画像の画素分解能が異なる場合の、表面粗さと色分布の拡がり幅との関係を示す。色彩計と試料の距離を調整して色彩計の視野を拡大縮小させることで、画素分解能を変化させた。照明光源は、ハロゲン光源を用いた。画素分解能の細かい方が、傾きが増加し、表面粗さの変化に対して大きく色分布が拡がった。これは、画素分解能が細かい方が表面形状の違いを高精細に撮像することができるためである。一方、視野中心から±30mm内における色分布の拡がり幅のばらつきは、画素分解能の粗い方が減少した(図7)。これは、画素分解能によって視野内の測定位置が変わり、画素分解能が粗い方が、撮像レンズの収差が小さい視野中心近傍で測定できるためである。傾きは大きく、ばらつきは小さい方が望ましいことから、画素分解能は0.05mm/px～0.1mm/pxがよいと考えられる。

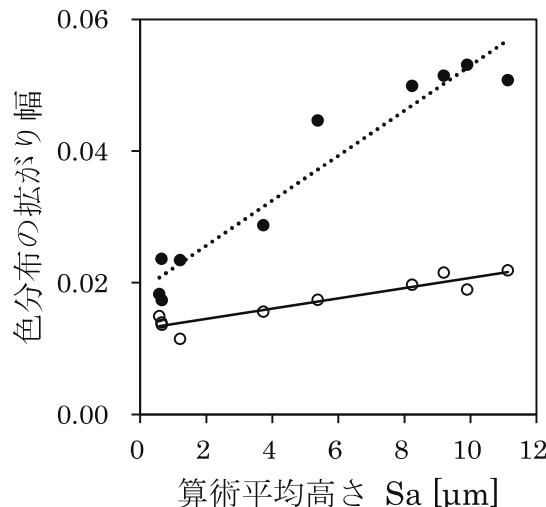


図6 表面粗さSaと色分布の拡がり幅の関係
(測定画像における画素分解能の違い)
● : 0.025mm/px、○ : 0.2mm/px、
光源はハロゲン光源。

3.3 照明光源色の違い

図8に、各色の照明光源における、表面粗さと色分布の拡がり幅の関係を示す。画素分解能は0.1mm/pxとした。光源の色によって色分布の拡がり幅に違いが見られ、回帰直線の傾きも変化した。

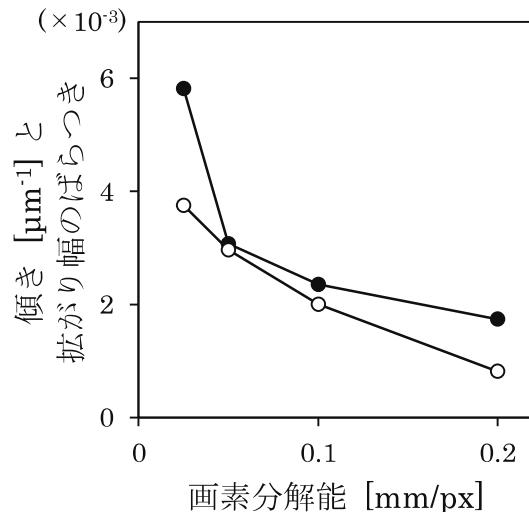


図7 画素分解能に対する回帰直線の傾きと
拡がり幅のばらつきの関係
● : 拡がり幅のばらつき (RMSE)、
○ : 回帰直線の傾き。

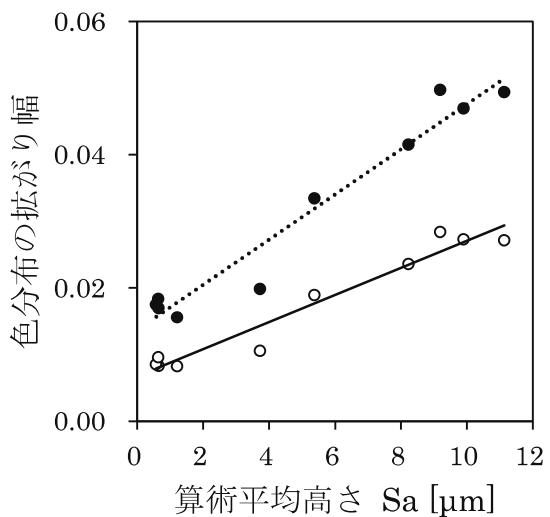


図8 表面粗さSaと色分布の拡がり幅の関係
(照明光源の違い)
● : LED(Green)、○ : ハロゲン光源、
画素分解能は0.1mm/px。

緑色のLEDはハロゲン光源と比べてSaに対して大きく色分布が変化することがわかった。光源の色によって、傾きに違いが生じた理由は、xy色度図における色の分布の不均等性にあると考えられる。xy色度図では、違いを判別できる色間の距離が、例えば、青色に比べて緑色の方が遠い。このため、緑色の方が少しの色変化で分布が大きく拡がる。

一方、色分布のばらつき量は、緑色のLEDが最も大きい結果となり、傾きが大きくても表面粗さの推定精度は向上しないことがわかった（図9）。精度を向上させるためには、傾きが拡がり幅のばらつき量より大きい、ハロゲン光源と赤色のLEDが優位であることが確認された。

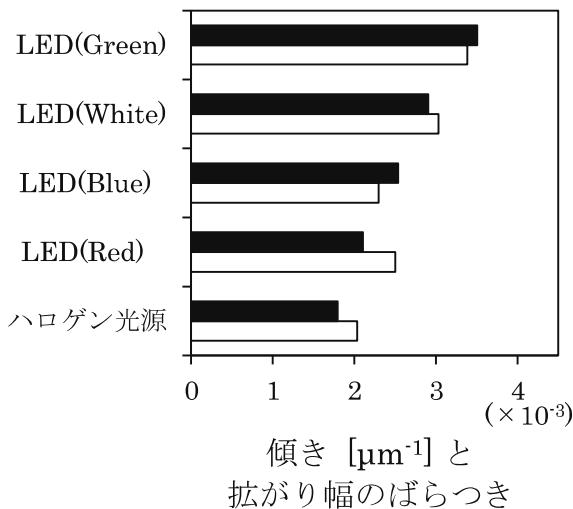


図9 各光源における回帰直線の傾きと拡がり幅のばらつき
黒：拡がり幅のばらつき (RMSE)、白：回帰直線の傾き。

3.4 評価面積の違い

表面粗さを評価するために必要な最小の面積を評価した。図10に、表面粗さと色分布の拡がり幅の関係における評価面積の違いを示す。ハロゲン光源で試料を照明し、画素分解能は0.1mm/pxとした。評価面積を広げると、傾きには大きな変化がみられないが、拡がり幅のばらつきが小さくなつた。

図11に、評価領域の画素数と傾き、および拡がり幅のばらつきの関係を示す。画素数を増やしても、100（縦10×横10）画素以上では傾きにほとんど変化はみられなかった。拡がり幅のばらつきは、画素数が多い方が減少し、625（縦25×横25）画素以上では飽和状態になった。このことから、表面粗さの評価に必要な領域は、画素分解能0.1mm/pxの場合、縦25×横25画素（縦2.5mm×横2.5mmに相当）以上あればよいことがわかった。

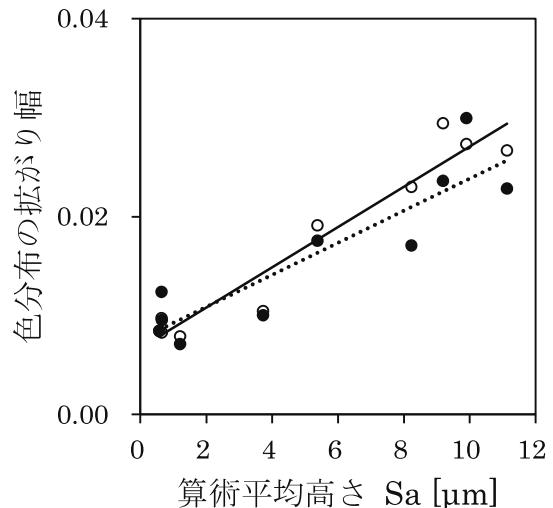


図10 表面粗さSaと色分布の拡がり幅の関係
(評価面積の違い)
●：6×6画素、○：25×25画素、画素分解能は0.1mm/px、光源はハロゲン光源。

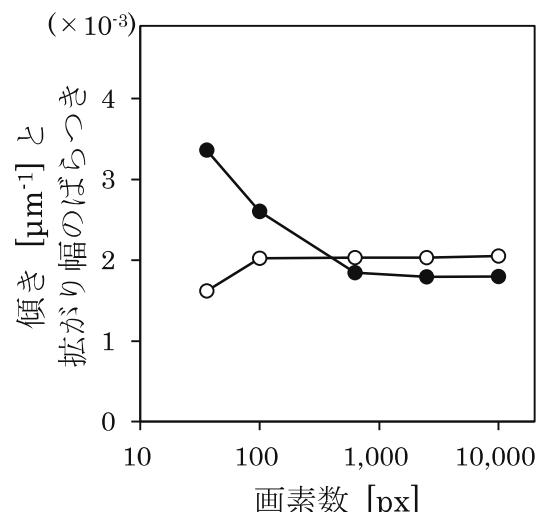


図11 各画素数における回帰直線の傾きと拡がり幅のばらつき
●：拡がり幅のばらつき (RMSE)、○：回帰直線の傾き。

3.5 表面粗さの推定精度

図12に、 $S_a=0.7 \mu m \sim 11 \mu m$ の表面粗さに対して最適化した測定系における表面粗さと拡がり幅の関係を示す。また、表に測定条件を示す。回帰直線の傾きは、 $2.0 \times 10^{-3} \mu m^{-1}$ 、視野中心から±30

mmの範囲内における拡がり幅のばらつきはRMS Eで 1.8×10^{-3} であった。このことから、Saの推定精度（回帰直線の傾きに対する拡がり幅のばらつき量RMSE）は、 $\pm 0.91 \mu\text{m}$ と考えられる。

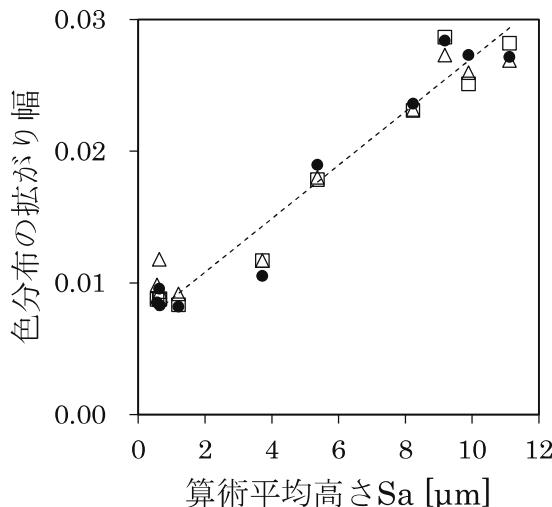


図12 最適化した測定系における表面粗さSaと色分布の拡がり幅の関係

●：視野中心、△：中心から照明側に30mm近づいた位置、□：中心から照明30mmの位置で測定した色分布の拡がり幅。

表 測定条件

画素分解能 [mm/px]	0.1
照明光源	ハロゲン光源
評価面積 [px]	50×50
撮像レンズ	
・焦点距離 [mm]	15
・絞り値	2.2
積算回数 [回]	16

4 まとめ

2次元色彩計で測定した試料表面の測色値の分布から表面粗さを推定する方法について、推定精度を評価した。表面粗さと色分布の拡がり幅の関係から回帰直線を求め、その傾きと視野中心から $\pm 30\text{mm}$ の範囲内における拡がり幅のばらつき量を評価した。

(1) 画素分解能が細かくなると、傾きは増加し大きく色分布が変化するが、拡がり幅

のばらつきも増加した。両者のバランスを考慮すると画素分解能は $0.05\text{mm}/\text{px} \sim 0.1\text{mm}/\text{px}$ が適当であった。

- (2) 照明光源の色によって、傾きと拡がり幅のばらつき量が変化した。ばらつき量に対して傾きが大きいハロゲン光源と赤色のLEDが優位であった。
- (3) 表面粗さを評価するための領域を広くすると、拡がり幅のばらつき量が減少した。評価領域は画素分解能 $0.1\text{mm}/\text{px}$ の場合、 2.5mm 角以上あれば推定精度が変わらないことがわかった。
- (4) 傾きと拡がり幅のばらつき量から見積もった表面粗さSaの推定精度は、 $Sa=0.7 \mu\text{m} \sim 11 \mu\text{m}$ の表面粗さに最適化した測定系では、 $\pm 0.91 \mu\text{m}$ であった。

本方法は、検査対象の色測定と同時に、表面粗さに起因する質感の違いを定量的に評価する用途にも利用することができる。また、製品加工面の表面粗さを短時間で定量的に評価できれば、品質検査を自動化することができ、生産性を向上できる。

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) 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).
- 3) 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3報）。2022年度精密工学会秋季大会学術講演会講演論文集，p.187-188，オンライン (2022).