ホログラフィック回折光学素子による 光沢面検査用 RGB 照明の開発*

西郷知泰** 柴田進*** 堀米秀嘉† 服部公央亮†† 田口 亮††† 梅崎太造†

Development of Holographic RGB Lighting System for Glossy Surface Inspection

Tomoyasu SAIGO, Susumu SHIBATA, Hideyoshi HORIMAI, Koosuke HATTORI, Ryo TAGUCHI and Taizo UMEZAKI

A lighting module using a holographic optical element (HOE) for glossy surface inspection has been developed and demonstrated. This lighting module has several advantages for such kind of inspection compare to the usual lighting system. The differences between HOEs lighting system and usual lighting system were discussed. HOEs were fabricated by our originally developed ultra-high speed collinear holographic printer. The several optical systems and image processing method using hue also were developed, the validity of our system for actual defect was investigated.

Key words: holographic optical element, glossy surface inspection, collinear holographic printer, structured light, chromatic dispersion, machine vision lighting

1. 緒 言

現在の量産製造ラインでは加工／組立工程の自動化が高度に進んでおり、画像処理による外観検査も多くの工程で用いられている。しかしながら、光沢物の表面検査に関しては、対象の形状や設置精度により撮影画像が大きく変化してしまう問題点がある。また、広い検査範囲に対して微小欠陥検査を求められるが、このような不良は表面の法線方向変化はあるものの形状変化量としては少ないことが多いため、自動化の難度は未だ高いのが現状である。

光沢面に対する高精度な形状計測手法としては、共焦点法¹⁾や干渉法²⁾を用いる等が挙げられる。しかし、これら手法は「対象物とレンズ間の距離が短く視野範囲が狭い」、「計測に必要な計算コストが大きい」等、実用上の課題が多い。そのため、加工／組立が高度に自動化された製造ラインにおいても、光沢物の表面検査は熟練工の目視による官能検査を実施しているケースが大半である。

一方で近年、大面積アクティブ照明を用いた検査システム^{3)~5)}が複数提案されている。照明面から散乱光が照射される方式であり、光源として大型の液晶モニタやスクリーンが使用される。この照明／カメラまたは対象物をロボットにより移動させ、多くの形状に対応できるよう工夫された物もあるが、設備の大型化・高コスト化が課題である。

そこで我々は、光沢表面の法線方向変化の検出に適した照明システムを提案する。提案システムではホログラフィック回折光学素子(Holographic Optical Element, 以降 HOE)を利用する。HOE はレンズやプリズムに比べて大きい色分散を持つが、提案システムではこの特性を活用しており、表面法線方向の変化に

応じた照明角度変化を色情報として取得することができる。このため、検査に必要な基本的な処理は単純な色変換となり、計算コストを低く抑えることができる。画素ごとに独立に計算することができるため、GPGPU やマルチスレッドなどの並列処理にも適する。本論文では、HOE を用いた照明システムを構築し、構造化照明などを含む他の照明方法との比較実験を報告する。また、ハンディタイプのユニット等の試作を行い、ブツ不良やハジキ不良やガラス表面に対する撮影・処理例を示す。

以下に本論文の構成を示す。2 章では、反射表面の検査に関する光学系について述べる。また、従来の照明系と提案のシステムについて説明し、提案システムの特徴を示す。3 章では、大面積 HOE の製作に使用したホログラフィックプリンタの概要を説明し、本プリンタにより印刷された HOE についての説明と基礎的な特性の評価結果を述べる。4 章では、実際に構築したシステムを紹介するとともに、他の撮影手法との比較を含む評価実験結果を示す。5 章では、ハンディタイプの撮影ユニット等、光学レイアウトを変化させた応用例を示す。最後にまとめと今後の展望／課題について述べる。

2. 光沢を持つ対象の検査

本研究の対象でもある対象物表面の法線方向を取得する手法について述べる。対象が発光特性を有さない場合、照明を光源とする光は対象表面で、鏡面反射と拡散反射に分離すると考えることができ、観測される輝度 L は式(1)に従いモデル化される。

$$L(k^c) = A(k' \cdot k^c)^a - Bk^{in} \cdot n \quad (1)$$

$$k' = k^{in} - 2(k^{in} \cdot n)n \quad (2)$$

ここで、 A は鏡面反射強度、 B は拡散反射強度であり、 k^{in} は照明光の進行方向、 n は対象表面の法線方向、 k^c は視点方向である。 k' は式(2)で定義され、鏡面反射光の方向に対応する。 a は鏡面反射の度合いで大きいほうが急峻な変化を起こし、一般に $a > 1$ である。式(1)の第 1 項は Phong の反射モデル、第 2 項は Lambert の余弦則として知られている。

散乱反射の寄与が大きい($A \ll B$)対象を観察する場合、散乱

* 原稿受付 平成 29 年 5 月 8 日

掲載決定 平成 29 年 8 月 31 日

** 正 会 員 名古屋工業大学大学院 (名古屋市昭和区御器所町)

*** (株)マクスエン지니어リング (名古屋市千種区田代本通 2-13)

† (合)3Dragons (愛知県名古屋市昭和区御器所町)

†† 中部大学 (愛知県春日井市松本町 1200)

††† 名古屋工業大学大学院

‡ 正 会 員 名古屋工業大学大学院

東京大学大学院 (東京都文京区本郷 7-3-1)

光は照射角度が広いと、カメラの位置に依らず安定した画像を得ることができる。これは、式(1)の第2項が視点方向の情報を持たないことで理解できる。このような対象に対しては、三次元形状を得た後に法線方向を推定することが一般的である。散乱反射を有する対象の三次元計測を行う光学系の例を図1(a)に示す。なお、図1に示す図は全て簡単化のため二次元的に表現しており、カメラ位置が原点、照明はy軸上に存在するとしている。図1(a)では、レーザー光やプロジェクタのように小さい光源部から光を対象に照射している。表面にて広い角度で散乱反射が生じるため、カメラは対象表面にプロジェクタから投影されたパターンを安定して観察することができる。撮影画像から対象表面のカメラに対する角度(k^c)とプロジェクタ投影角度(k^{in})を知ることが出来、事前校正によりプロジェクタ位置(y^{in})が既知であれば、三角測量の原理により対象表面の位置(x_0)を計算することができる。しかし、式(1)を元に表面の法線方向を直接計算することは困難である。

一方、鏡面反射が主となる($A \gg B$)ような対象を観察する場合、観察位置に応じて大きく像が変化する。そのため、大面積の散乱面を照明として設置し、カメラに撮像されるのが照明のどの位置を光源とするかを識別することにより対象表面の情報を得る方式がある。図1(b)に光学系の例を示す。知りうる情報は、カメラから見た入射光の方向 k^c と光源位置($0, y^{in}$)である。対象表面の位置が $x = x_\alpha$ とした場合、 k_α^{in} を計算することができる。また、 $k^c = k'$ とみなせるため、式(2)より表面の法線方向 n_α を計算可能である。しかし、図1(b)に図示されているとおり、位置が $x_\beta (\neq x_\alpha)$ のときの法線方向は $n_\beta (\neq n_\alpha)$ となる。一般に x は未知であるため、法線方向を一意に決めることができない。このと

Fig.1 Differences of surface information

き、観測点近傍では急激な高さ変化はないと仮定することで、光源位置の変化を角度変化として形状判定に用いることができる。法線方向が $\Delta\theta$ 変化するとき、三次元形状の変化は(画像解像度) $\times \tan \Delta\theta$ 程度である一方、光源の位置変化は(対象と光源間の距離) $\times \sin \Delta\theta$ の程度となる。画像解像度は 0.1mm オーダー、対象と光源間の距離は 100mm オーダーであることが多く、反射面に映り込んだ光源位置の変化により表面の角度変化を敏感にとらえると考えられる。急峻な変化がないという仮定は、鏡面の検査対象の前提として妥当と考えられるものの、法線方向を直接求められないことが課題として残る。

次に HOE による照明について考える。詳細は 3 章にて述べるが、HOE により色毎に異なる照射角度を持つ広い平行光を生成することができる。得られる情報を図1(c)に基づいて説明する。カメラから見て k^c 方向に、緑の光を観察したとする。緑の光は光源から k^{in} の方向に照射されるとすると、 x 位置の仮定がなくとも式(2)から法線方向 n を計算することができる。 x の位置の応じて y^{in} が変化することにより、対象の高さ情報と法線情報を完全に分離でき、前述のとおり光沢面検査において重要な法線情報を得られることは非常に有用である。

次に撮像系の焦点位置について考察する。対象表面の微小な欠陥を識別するため、対象表面にカメラのピントを合わせることが望ましい。しかし、対象が鏡面の場合、「対象を鏡として照明を観察する」と捉えることもできる。図2のように、対象表面にピントを合わせると、複数の光源位置から来る情報が積算(平均化)されたものを撮影することになり、照明の光源位置を正確に知ることが困難となる。これは図1(b)に示される方式では大きな問題となるため、実際には対象表面での解像度を犠牲にして対象と照明の間に焦点位置を置く場合が多い。一方、HOE を用いた場合には、照明色から判定できる照射角度は光源位置に依存しない。このとき、光源位置のずれにより対応点へ照射光角度に変化が生じ、照明色が混色する。しかし、連続スペクトルを持つ光を照射する場合、判定基準となる色相は前後の色でキャンセルしあうことになる。従って、HOE によるシステムでは、対象表面にピントを合わせた状態での計測が可能であり、微小な欠陥の判定に対して有用である。

3. 回折光学素子及び HOE プリンタ

HOE の特性と製作に使用したプリンタの概要を説明する。

回折現象は、Bragg の法則により理解することができる。薄い回折で回折面に光が垂直入射する場合、式(3)で記述することができる。

$$\sin \theta_B = m\lambda / \Lambda \quad (3)$$

ここで、 λ は入射光の波長、 Λ は入射光波面方向の格子周期、 m は回折次数、 θ_B は Bragg 回折による角度変化である(図3(a))。

光学素子の色分散の大きさは Abbe 数で表現され、数字が 0 に

Fig.2 Focal position

近い方が波長による光路変化の違いが大きいことを意味する。レンズ等の屈折光学系では、波長による屈折率の変化が寄与するのにに対し、回折光学系では式(6)に示すように、波長は直接的に回折角度に影響を及ぼす。HOE の Abbe 数は $v_d = -3.452$ となる。ガラス等、通常の屈折型光学素子の Abbe 数は $v_d = 50$ 程度であり、回折光学素子は屈折型に比べ 10 倍程度で逆方向の色分散を持つことがわかる。

ホログラフィは、2つの光（物体光と参照光）の干渉パターンをホログラム材料に記録することにより、参照光方向から入射した光が回折され、物体光を再生する技術である（図 3(b)）。この技術により、物体光として複雑な構成の光を再生可能であり、立体映像⁹⁾のほか光学素子^{7)~9)}としても活用されている。本研究では、ホログラフィ技術で作成された HOE を回折光学素子として使用する。

本稿の目的である表面検査用の照明を実現するため、大面積で高い回折効率を有する回折光学素子を製作した。偽造防止等で多用される表面ホログラムは、大面積化は容易だが回折効率が低い。本稿で使用する HOE は、フォトポリマーによる位相型体積ホログラムを用いており、入射光を位相変調により回折さ

せる方式であるため光のスループットが高く、高い回折効率を得ることができる。反射型ホログラムであれば回折の高い波長選択性により色分散の影響を大幅に低減できるが、本稿では色分散を活用した照明を実現するため波長選択性が低く、色分散の影響が大きい透過型ホログラムを用いた。筆者らが開発した高速 HOE プリンタ¹⁰⁾の外観を図 4 に、図 4 左部に設置されている光学ヘッド内の構成を図 5 にそれぞれ示す。このプリンタでは、緑(532nm)のレーザーを光学ヘッドにより左右に走査しながら、最大 300mm×300mm の透過型体積ホログラムを作成する。レーザー光源から導光された光は光学ヘッド内で二つのレーザー（物体光、参照光）に分岐され、対物レンズを通してフォトポリマー上で重なり合うことで干渉パターンがフォトポリマーに記録される。物体光を光学ヘッド内部のチルトミラーを用いて制御することで、ライトフィールド型ホログラムを製作することが可能となっている。参照光と同じ方向から来る光を照射したとき、作成された HOE は高い指向性を持って物体光方向に光を回折することができる。

一般に、ホログラムの記録は振動に非常に敏感である。本プリンタでは、振動の干渉パターンに与える影響を大幅に低減できるコリニア光学系¹¹⁾を光学ヘッド内に構成しており、10ns パルスの Q スイッチ YAG レーザーを用いることで光学ヘッドを移動させながらホログラム記録を行うことを可能としている。本プリンタでは最大 240mm/s で、1 秒間に 2000 点の印刷が可能であり、その速度で 74% の回折効率が達成可能である。単焦点レンズのように、回折方向を連続的に変化させることで実現できる光学素子の場合、上述の高速印刷で作成することができる。本稿で使った HOE は、全て上記の条件を満たしており、高速に製作可能である。本稿で示す色分散平行光学系は、理論的にプリズム等を用いることで構築することが可能である。しかしながら、HOE は色分散が大きく、物体表面の法線方向に応じて色相が大きく変化する。さらに、フィルムは 0.1mm と非常に薄く軽量であり、プリズムでは製作が困難な光学レイアウトを容易に作成可能である。なお、作成した HOE は、直射日光の入らない 5℃～35℃程度の室内環境であれば安定した品質を維持することができる。

図 6 に実際に製作した HOE の回折角度データの一例を示す。製作したホログラムは垂直入射する緑色(532nm)の平行光が 13.5 度方向に回折するプリズム型ホログラムである。実験結果から、各色の回折角は青(450nm)が 11.2deg、緑(532nm)が 13.5deg、赤(635nm)が 15.9deg であることを確認した。

4. 色分散構造化照明の特性

本章では、構築したシステムの紹介と他の撮影手法との比較実験を含む実験結果を示す。本稿で提案する HOE のもつ強い

Fig.7 Prism type HOE lighting system

色分散を活用した「光沢面の法線方向変化に応じて色相変化を生じる」という機能を持つ構造化照明を以降「色分散構造化照明」と呼ぶことにする。4.1 節では、比較実験により提案法の有効性を示す。4.2 節では、微小不良に対して大面積照明と比較する。4.3 節では、検査範囲に関する実験と考察を示す。

4.1 様々な光学系との比較

色分散構造化照明の基本特性を評価するため、120mm 角の範囲で図 6 の回折特性を有する均一な HOE を作成した。白色 LED 点光源をレンズにより平行化し、白色光源の前に HOE を設置することでプリズム型色分散構造化照明を構築した (図 7)。本章の実験では縦方向は均一色となるように構造化照明の前に縦拡散板を設置した。カメラと対象間の距離、及び照明と対象間の距離は 400mm とし、 $f=50\text{mm}$ の CCTV レンズを用いて $30\text{mm} \times 22.5\text{mm}$ の範囲を撮影した。

検査対象は樹脂平板上に存在するブツ不良とした。ブツ不良は三角形マーカーの先端下側に存在している。ブツ不良の断面を図 8 に示す (接触式測定機「東京精密 SURFCOM 1400D」で測定)。幅 0.8mm 程度の範囲に高さ $8\mu\text{m}$ の突起が存在している。断面グラフより得られたブツの最大傾斜は 3.0 度である。

まず、図 9(a) に点光源での撮影結果を示す。物体表面の鏡面反射成分が強いため、光源部分のみが明るく映る。黒色で撮影画像中央上に確認できる三角形マーカー下部に不良部分が黒点として撮影された。しかし、照明範囲は 10mm 角程度であり、検査可能な範囲は狭い。

図 9(b) にプロジェクタ光 (縞パターン) を物体に照射したケースを示す。広い範囲にプロジェクタ光が投影されるが、鏡面物

Fig.8 Height Profile measured by contact probe

体を撮影する場合、プロジェクタ光源がカメラと物体に対して鏡像の位置にない限り、プロジェクタ光を撮像することはできないため全体が暗くなり、不良を識別することも非常に困難である。さらに、投影したパターンも撮影できないため、三角測量に基づいた計測も適用できない。また、プロジェクタ光源の光を受光する位置から撮影した場合、点光源の場合と同様の性質を示す。以上より、鏡面物体の検査用光源としては不適である。

次に、図 9(c) に拡散板を使用した面発光照明を光源とした撮影画像を示す。画面全体に照明光が確認できるが、不良の識別は困難である。これは、光が広い範囲に均様に拡散しており、不良により光線方向の変化を観察できないためである。図 9(a) と図 9(c) の結果から、均一光の照明では照明範囲と不良識別性能とはトレードオフの関係にあることがわかる。

次に、場所毎に光量の異なる照明 (光源位置構造化照明と呼ぶ) を用いて撮影を行った。照明として、LCD モニタを使用している。図 9(d) は白黒の矩形縞パターンを照射したものである。対象にピン点を合わせているため、照明光がぼけて見えるが、不良の識別は可能である。

図 9(e) はカラーパターンを用いた光源位置構造化照明を照射したものである。投影したパターンは RGB 毎に $2/3\pi$ 刻みで位相をずらした正弦波パターンである。この照明でも不良の識別は可能であり、光源位置変化に起因する色変化も確認できる。

最後に、図 9(f) に提案法である色分散構造化照明による結果を示す。鏡面反射成分の強い平面を計測した場合、カメラレンズに入射する光の角度変化に応じて光源の照射角度が変化するため、それに対応した色変化が生じている。しかし、本照明でも図

Fig.9 Captured images by three different light condition

Fig.10 Brightness/Hue profile and vertical differences

9(d), (e)と同様に不良を識別することができる。

光源位置構造化照明と色分散構造化照明について、不良の識別性能について比較した。図 10(a), (b), (c)は不良が存在する位置での画像横方向の断面である。図 10(a)の縦軸は白黒縞パターン照明時 (図 9(d)) の明度であり、図 10(b),(c)の縦軸はそれぞれ、カラーパターン照明時 (図 9(e)), 色分散構造化照明使用時 (図 9(f)) の色相である。

実験は、画像縦方向に照明が均一となる条件で実施した。そこで、不良が存在しない領域での明度/色相の平均を算出し、平均からの差分値を図 10(d), (e), (f)にプロファイルとして示した。全ての場合で不良が存在する領域で大きな差分値が確認できる。図 10(e)において、カラーパターンで位相ギャップが存在する領域のデータは削除して表示している。このグラフから差分最大値と不良が存在しない領域の差分値ばらつきから S/N 比を計算し、縞パターンでは 31.3dB, RGB パターンでは 30.3dB, 色分散構造化照明では 37.6dB という結果が得られた。この結果より、提案法は良好な不良検出特性を持つと言える。

4.2 微小ブツに対する評価

4.1 節において、光源位置構造化照明と色分散構造化照明を比較した。本節では、不良検出感度の比較を目的として、さらに微小な不良を用いて評価した。不良はブツ不良であり、高さが変化している範囲は 0.4mm 程度である。図 11 に提案法の撮影画像と色相差分画像を示す。図 11(a) が撮影画像、図 11 (b) が不良部分の拡大画像、図 11 (c) が 4.1 節で述べた手法で生成した差分画像である。不良部分のみ高い差分値が得られることがわかる。4.1 節と同様に S/N 比を計算した結果、26.2dB という結果が得られた。

Fig.11 Result of HOE light

図 12 は白黒縞パターンによる光源位置構造化照明を用いた結果である。不良部以外にも強いノイズが存在し、S/N 比は 18.1dB であった。図 13 はカラーパターンによる光源位置構造化照明を用いた結果である。差分画像を見る限り、白黒縞パターンよりは良好な撮影結果であるものの、S/N 比は 22.2dB であり、色分散

Fig.12 Result of stripe pattern

Fig.13 Result of color pattern (low frequency)

Fig.14 Result of color pattern (high frequency)

Fig.15 Snapshots and image processing results at three position

Fig.16 Vertical differences of Hue at each position(Fig.15(a),(b),(c))

構造化照明より 4dB 低い結果を示した。対象が微小であるため、短い周期の正弦波パターンが適している可能性がある。そこで、図 12 の 1/4 の周期を持つカラーパターンを投影した。図 14 がその結果である。画面全体がほぼ白色であり、RGB の変化はほとんど確認できない。これは 2 章の図 2 で考察したように、対象にピントを合わせている影響で照明面でのピントがぼけ、RGB が混色したためである。均一な面発光照明と同様に、周期を短くしたカラーパターンを投光した場合、不良検出はできなかった。

この実験において色分散構造化照明は、光源位置構造化照明と同程度以上の不良検出感度を有することが確認された。

4.3 色分散構造化照明の検査範囲

不良の検出可能範囲を検討するため、サンプルの位置を変えた場合の影響を確認した。4.1 節で使用した 0.8mm 幅のブツ不良を画面左から右に移動させながら撮影した (図 15)。ブツ不良が画面左の赤色領域にある場合 (位置 A, 図 15(a))、画面中央の緑色領域にある場合 (位置 B, 図 15(b))、画面右の青色領域にある場合 (位置 C, 図 15(c)) をそれぞれ撮影した。図 16 は図 15(a),(b),(c)それぞれの画像での不良を含む位置での色相差分値の横断面グラフである。場所によらず、安定した色相変化が生じており、不良を検出可能なことがわかる。この結果は一度の撮影で広い範囲の微小な法線方向変化が検知可能なことを示しており、接触・非接触方式の鏡面計測が可能な三次元計測を適用した場合に比べ、格段に速い検査速度が実現可能である。また、法線

Fig.17 Handy type HOE unit

方向を色情報により識別するため、単一画素での検査も可能である。このため、干渉法や従来の構造化照明などのテクスチャ解析が必要な手法に比べ、少ない計算コストで検査が実現可能である。

しかしながら、図 15(c)において不良の右側部分が検出できていない。これは、その部分において対応する光線角度を有する光が存在していないためである。さらに、本実験では平板を対象としたが、実サンプルでは様々な R 形状を有することが想定される。これらの問題に対応すべく、形状に応じた HOE の検討を進めたいと考えている。

5. 応用システム

本章では、3つの異なる光学レイアウトでの実験を行った。5.1 節では利便性の向上を目的として試作した、持ち運び可能な小型光学システムについて述べる。5.2 節では、後段の画像処理の単純化を目的として構築した、平面に対して撮影画像全体が均一の色相となる光学システムについて述べる。さらに、5.3 節では点光源を用いてカメラと同軸に照射される光学系を構築した。本章では、色分散構造化照明とカメラを含めたこれら光学系をホログラフィック RGB 照明ユニットと呼ぶことにする。

5.1 ハンディ型ホログラフィック RGB 照明ユニット

利便性向上を目的として、横幅 60mm、奥行き 120mm、高さ 250mm のハンディタイプのユニットを試作した (図 17)。光学系は図 7 と同様であるが、使用した HOE のサイズは 30mm であり、検査範囲は 10mm とした。カメラ、モニタ、照明ユニット

Fig.18 Spot defect

Fig.19 Height profile of cissing measured by contact probe

Fig.20 Snapshot of cissing Defect

ともバッテリー駆動で撮影画像も PC に無線転送可能であり持ち運びが容易な設計となっている。目視での不良の一次検出を容易とすることを第一目的としており、撮像色は青色として陰影により不良を認識することができるようにしている。

図 18 に、実際の樹脂成形品の曲率を有する表面上に存在する 2 種のブツ不良 (A, B) の撮影画像を示す。不良 A は 0.6mm 程度、不良 B は 1.4mm 程度のブツサンプルである。図 18(a), (c) は本ユニットにて撮影した画像、図 18(b), (d) はそれぞれ図 18(a), (c) の画像に対して 4.1 節で述べた色相差分処理を適用した結果である。曲面上に存在する不良に対してもハンディ型ホログラフィック RGB 照明ユニットによる撮影にて、目視、色相変化ともに不良部のみが明瞭に検出できている。2 種の不良で陰影の違いが認められるが、これは形状の違いによるものと思われる。不良のサイズや傾斜角度 (法線方向) の関係については、今後詳細に検討を進めたい。

次に、ハジキと呼ばれる不良に対して撮影した。ハジキ不良は塗装不良の一種であり、接触式測定機での断面グラフを図 19 に示す。塗装膜厚に相当する 20 μm の凹みが存在し、最大傾斜は 4.2 度であった。ハジキ不良をハンディ型ホログラフィック RGB 照明ユニットによる撮影例を図 20(a)、色相差分の結果を図 20(b) に示す。塗装膜の有無による凹み等を明瞭に確認できる。

Fig.21 Height profile of glass surface measured by contact probe

Fig.22 Snapshot of glass waviness

Fig.23 Diagram of uniform background color unit

Fig.24 Snapshot of uniform background system

さらに、透明ガラス上の凹凸を評価した。接触式測定機による対象の断面図を図 21 に示す。1~2 μm の凹凸が多数存在しており、最大傾斜は 0.5 度程度である。撮影例を図 22(a) に示す。色相差分の結果を図 22(b) である。この結果から、透明ガラス上の 1~2 μm 程度の表面の凹凸も認識可能であることがわかる。

5.2 均一色相型ホログラフィック RGB 照明ユニット

次に、単一点集光型の HOE を用いることで、同一法線方向からのカメラに入射される光が同一色となる光学系を構築した。

Fig.25 Diagram of point light source and coaxial system

Fig.26 Snapshot of coaxial system

光学系の模式図を図 23 に示す。このシステムを試作し、0.8mm 程度のブツ不良を撮影した画像を図 24(a) に示す。20mm の視野範囲全体が緑色一色で撮影されていることが確認できる。図 17 のハンディ型ホログラフィック RGB 照明ではプリズム型 HOE を使用しており、基本的に青色が照射され陰影により不良を確認するため、図 24(b) のように照射範囲が限定されていた (図 20, 22 は不良部分の拡大図を使用)。それに比べ、均一色相型ホログラフィック RGB 照明では、より広い範囲を照射範囲とすることができる。不良部の画像と色相差分の結果を図 24(c), (d) に示す。目視でも赤、青の部分が確認でき、図 18 に比べて色相変化量が大きい。

今回の試作は 40mm 角の HOE を用いて 20mm 角の視野を持つユニットを構築したが、開発したプリンタでは 300mm 角の HOE が製作可能であり、より広い視野範囲を一度に検査できる大型光学系を構築することも可能である。HOE は薄く軽量のフィルムであることも大型化に有効である。

5.3 同軸型ホログラフィック RGB 照明ユニット

集光型 HOE を用いることで、点光源を平行光に回折させる光源ユニットを作成することができる。ここでは、2 枚の HOE を組み合わせ、点光源からの光を 1 枚目の HOE で回折して再生した平行光を 2 枚目の HOE の参照光とし、ワーク上で集光させる光学系を試作した。模式図は図 25 であり、撮影例と不良部の撮影結果を図 26 に示す。この方式では、ターゲット点の全周囲の法線変化を 1 回の撮影で観察することが可能となる。この光学系は突起物の先端形状の測定や穴加工後の形状検査に適しているため、今後これらサンプルへの適用検討を進めたい。

今後、集光型 HOE とレーザープロジェクタを組み合わせ、アクティブ照明の機能を持たせることで、鏡面物体の三次元計測等への応用も期待される。

Table 1 Parameters of proposed systems

	Field of view mm	Light area mm	Basic Hue gradation deg/mm	Std. dev. of Hue deg	Typical Hue difference at defect deg
Prism Fig.9(f), 11,15	30	20	18.2	1.8	133
Handy Fig.18,20 ,22,24(b)	18	10	6.2	1.5	21
Uniform Fig.24(a)	16	16	2.5	11.3	100
Coaxial Fig.26	16	4	47.8	4.6	70

6. 結 言

本稿では、鏡面反射成分の強い対象表面の検査に適した色分散構造化照明を提案した。目的に合致した強い色分散をもつ高指向性の平行光を作成可能な光学素子として HOE を採用し、実際に照明システムを構築した。この照明システムの光源は LED 照明でよく、LED 照明の前面に薄く軽量の HOE を挿入することで、システム構築が可能であることも実用上優位である。

ブツ不良を対象とした評価実験では、構造化照明などを含む他の照明方法と比較し、提案法の有効性を確認した。さらに、ハンディタイプのユニット等の様々な光学レイアウトを持つユニットの試作を行い、樹脂表面のブツ不良をはじめとして、ハジキ不良やガラス表面に対する撮影・処理例も示し、ブツ不良以外への有効性及び応用システムの展望を示した。

我々の構築したユニットの光学特性を表 1 にまとめる。データは左から順にそれぞれ、画像視野、HOE による回折光が照射される範囲、ベースの色相変化、不良部以外での色相ばらつき (ノイズ成分)、0.8mm 程度のブツ不良 (上から順に図 9(f), 図 24(b), 図 24(a), 図 26 中の不良) での色相差分の代表値となっている。本稿で提示した処理方法はプリミティブなものであるが、今後光学系と画像処理の検討を進めることで、より微小な不良をロバストに検出するシステムに発展可能であると考えられる。

謝 辞

本研究の推進にあたり、公益財団法人 堀科学芸術振興財団による研究助成をいただいております。心より御礼申し上げます。

参 考 文 献

- 1) D. B. Hovis and A. H. Heuer: The use of scanning confocal microscopy (LSCM) in materials science, *Journal of Microscopy*, **240**, 3 (2010) 173.
- 2) 北川克一: 光干渉法による三次元計測, 計測と制御, **50**, 2 (2011) 97.
- 3) D.-I. H. Loferer: Automatic painted surface inspection and defect detection, *SENSOR + TEST conference 2011. SENSOR Proceedings* (2011) 971.
- 4) 菅野直: 鏡面塗装品の欠陥検出技術<「変曲線マッチング法」による新しい欠陥検出技術の開発>, *プラスチック: 日本プラスチック工業連盟誌*, **64**, 7 (2013) 22.
- 5) 栗原徹, 吉村礼彦, 安藤繁: 外観検査 時間相関技術の塗装検査への応用, *画像ラボ*, **27**, 11 (2016) 1.
- 6) 久保田敏弘: 新版ホログラフィ入門—原理と実際—, 朝倉書店 (2010).
- 7) 中村典雄, 阪井寛志, 武藤俊哉, 早野仁司: フレネルゾーンプレートを用いた高分解能ビームプロファイルモニタの開発, *日本放射光学会誌*, **17**, 4 (2004) 220.
- 8) 星野功, 内山峰春: 液晶偏光ホログラムを用いた DVD 光ピックアップ, *光学*, **28**, 2 (1999) 71.
- 9) H. Mukawa, et al.: 8.4: Distinguished Paper: A Full Color Eyewear Display using Holographic Planar Waveguides, *The Society for Information Display Symposium Digest of Technical Papers*, **39**, 1 (2008) 89.
- 10) T. Saigo, et al: Ultra-high-speed holographic printer system for the photopolymer and evaluation of fabricated HOE's characteristics, *Proc. of OSA-OPJ Joint Symposia* (2016) 30pOD6.
- 11) H. Horimai, et al: Collinearholography, *Applied Optics*, **44**, 13 (2005) 2575.