

博士学位論文

ホログラフィック光学素子を用いた
光沢表面の検査方式に関する研究

2019 年

西郷知泰

目次

第1章	序論	3
第2章	外観検査における照明の特性	6
2.1	マシンビジョンシステム	6
2.2	電磁波としての光	7
2.3	物体表面での光の変化	9
2.4	表面検査システムで用いられる照明	13
2.4.1	マシンビジョン用照明の種類	13
2.4.2	拡散反射が主となる表面の検査方式	14
2.4.3	拡散反射が主となる表面の形状測定方式	16
2.4.4	光沢表面に対応する精密測定方式	17
2.4.5	大面積パターン照明を用いた検査方式	19
2.4.6	HOE 照明を用いた検査方式	21
2.5	まとめ	22
第3章	ホログラフィ	24
3.1	ホログラフィの原理	24
3.1.1	回折現象	25
3.1.2	回折による色分散	26
3.1.3	ホログラフィ	27
3.2	ホログラムの種類	29
3.3	ホログラムの記録	34
3.4	HOE プリンタの構成	36
3.5	HOE の特性	45
3.6	まとめ	47
第4章	光沢表面の法線方向の角度測定	49
4.1	測定原理	49
4.2	構築システム	51
4.2.1	実験機器の構成	51
4.2.2	計算に必要なパラメータの測定	55
4.3	平面ミラーに対する表面法線角度の測定	58
4.4	曲面ミラーに対する表面法線角度の測定	59
4.5	回折と色相	62
4.6	まとめ	66
第5章	HOE 照明を用いた外観検査	68
5.1	実験の構成	68
5.2	HOE 照明と既存の照明システムとの比較	71
5.3	微小不良に対する外観検査の検討	82
5.4	HOE 照明の検査範囲	87

5.5	まとめ	91
第6章	HOE 照明の応用例	93
6.1	ハンディ HOE 照明ユニット	93
6.2	均一 HOE 照明ユニット	99
6.3	同軸 HOE 照明ユニット	101
6.4	まとめ	103
第7章	結論	104
	謝辞	108
	参考文献	109
	研究業績一覧	116

第1章 序論

現在の量産製造ラインでは位置決めや外観検査などの作業に対し、画像処理技術を活用したマシンビジョンシステムによる自動化が進んでおり、その世界市場規模は2016年において1兆1,111億円であり、さらに、市場は年率10[%]程度で拡大し、2020年には1兆6,210億円になると予測されている^[1]。業種別に見ると、半導体・FPD関連が最も多く、市場規模4,790億円であり、観察・測定関連が3,300億円である一方、自動車関連は80億円であり、非常に小さい。これは、自動車部品の場合、内部部品の形状が立体的かつ複雑であり、また、種類も多種多様であること、及び外装部品は金属光沢を有する自由曲面形状であることが、自動車部品へのマシンビジョンの展開が遅れている原因と考えられる。そのような中、3次元測定技術等を活用して自動車部品をターゲットとした画像処理検査技術^{[2]-[8]}や画像によるバラ積みピッキング技術^{[9]-[11]}が開発されている。それら応用技術の発展により、自動車関連のマシンビジョンシステムの市場は年率800[%]という著しい成長が期待されている^[1]。

しかし一方で、未だ課題の克服が困難であり、マシンビジョンシステムの導入が限定的となっている対象が存在する。その一つとして、自動車ボデーやスマートフォンの筐体、ヘッドアップディスプレイ等で用いられる凹面ミラー等の光沢表面を対象とした外観検査である。光沢表面の場合、表面形状や光源、カメラの設置位置の微小な変化により撮影される画像が大きく変化する。その為、画像処理に適した画像を安定して取得することが困難であり、マシンビジョンシステムの構築が難しい。目視検査では、図1-1のように、広い範囲に蛍光灯をならべた環境^[12]で、対象表面に映る蛍光灯の像のゆがみを検出する方式が存在する。前述のとおり、対称の設置位置が変化するとき、対象表面に映る蛍光灯の像は大きく変化するが、熟練した作業員は視点移動を活用し、設置位置のずれ等の影響を吸収して、目視検査に適した条件で観察を行う。しかし、これは属人的で経験を要する作業であり、作業員は効率的に漏れなく外観検査を実施するには熟練した技量を要する。

一方、同様の原理によるマシンビジョンでの検査手法も提案されている。広



図 1-1 光沢表面を有する対象の例（写真は ASIA GATEWAY^[12]より引用）

い照射面積を有し、場所により照度を調整できるアクティブ照明（本研究では、大面積パターン照明と呼ぶ）を用いて縞パターンを投影し、その「濃淡のゆがみ」から外観検査を行う方式である^{[13]-[19]}。しかし、この従来法では設備が大型となりコストも高いことが課題である。また、複数の投影パターンに対して撮影が必要であり、検査時には光学系と対象が静止している必要がある。これは移動物体の測定や複数視野での広範囲高速検査には従来法は不適であることを示している。

そこで本研究では、これらの課題を克服するべく、光沢表面上の外観検査方式の新手法を提案する。提案法で用いる照明は照明内部にホログラフィック光学素子（Holographic Optical element, HOE）を搭載する。ホログラフィは光の干渉の記録と物体光の再生を可能とする技術であり、この特性を活用した物体の変形測定は古くから提案されている^{[20]-[24]}。しかし、これらの手法は大規模な光学装置が必要であり、基準となる対象を正確な記録する必要があるため、インラインでの運用には適していない。それに対し、本研究では、白色 LED 光源から照射される光が HOE により回折された光を従来のマシンビジョン用の照明光として用いる。このような構成であるため、従来のホログラフィ検査技術に

比べ、提案法はインラインでの運用にも適している。本研究で用いる、HOE を用いた照明を HOE 照明と呼ぶことにする。HOE 照明では、HOE により回折される光の有する色分散効果を活用し、照明光の光線方向に応じて波長が変化する、という従来の照明には存在しない特徴が実現される。HOE 照明の持つ特徴を利用することにより、1 枚の撮影画像中の「色の変化」からカメラに受光される光に対する照明光の光線方向を取得することができる。HOE 照明を用いることによって取得される照明光の光線方向の変化から、光沢表面の検査を行うシステムを構築することが可能であることを示す。提案法で用いる HOE は薄く軽量であり、従来のマシンビジョン用照明で用いられる LED 照明を光源として使用することができる。また、1 枚の画像から広い範囲の検査が可能である。本論文では、提案法がこれらの特徴を有し、前述の課題が克服可能であることを示す。

第 2 章では、光の性質を説明しながら、従来の光沢表面の外観検査方式と本研究で提案する HOE 照明による検査方式の概要を示し、従来法と提案法との比較を行う。第 3 章では提案法において非常に重要な構成部品である HOE について、その種類と特性を述べる。また、外観検査で用いる HOE を大面積、高速に HOE を作成する装置 (HOE プリンタと呼ぶことにする) を開発している。HOE プリンタに採用した HOE の高速作成技術、及び作成した HOE の性能についても記載する。第 4 章では、HOE 照明を用いた測定システムを構築し、ミラーを対象として光沢表面の法線方向の測定性能について検討を行う。次に、第 5 章では、本研究の目的である、光沢表面上に存在する不良の検出について議論する。提案法と従来法との不良検出性能の比較し、提案法の不良検出性能が最も優れていることを確認する。さらに、第 6 章では応用例として、コンパクトな検査システムを構築し、樹脂表面、ガラス表面、塗装面等における実際の不良に対する測定結果を示す。また、均一色相型や同軸型等、光学レイアウトを変更した構成例について述べる。最後に第 7 章にて、本研究で得られた知見を総括して結論を述べる。

第2章 外観検査における照明の特性

部品製造工程におけるマシンビジョンシステムの発展に伴い、対象の特性や用途に応じて様々な照明方式が提案されている。一方、照明光の光線方向等、活用されていない情報も存在している。光沢表面の外観検査においては、照明光の光線方向が重要であり、その点において現在のマシンビジョン用照明ではこの用途に適した照明方式は少ない。

そこで、本研究では、ホログラフィック光学素子 (Holographic Optical element, HOE) を用いることで、従来の照明にない効果を有するマシンビジョン用照明 (本研究では、HOE 照明と呼ぶことにする) を提案する。提案法で用いる照明の特徴を理解する為、本章では光の性質、及び拡散反射と鏡面反射の違いを、外観検査の観点から説明する。また、反射光の主成分が鏡面反射となる光沢表面での外観検査に適用可能な技術の原理と課題を説明し、最後に本研究で提案する新しい外観検査方式の概要を述べる。

2.1 マシンビジョンシステム

本節では、一般的なマシンビジョンシステムについて述べる。図 2-1 に基本構成の例として、指向性の低い LED 光源を配列させ、その前面に拡散板を入れることにより、広い範囲の検査対象を均一に照射する模式図を図 2-1 に示す。検査対象に照射された照明光は、物体表面で反射する。その反射光をデジタルカメラで撮影すれば、図 2-1 右下のようなデジタル画像を得ることができる。ここで、表面上に大きな凹凸が存在する場合には、照明光の届く量が減少し、それにより反射光量が減少して影として認識される領域が生じたり、表面上の微細な凹凸や光の吸収により、反射光量が変化する。これらの反射光量の情報を含んだデジタル画像に適切な画像処理を施し、特徴量を抽出することにより、不良検出等の目的を達成する。

物体の反射特性や取得すべき特徴量に合わせ、適切な照明環境を構築することにより、目的とする特徴量を抽出しやすい画像を得ることができる。そのた

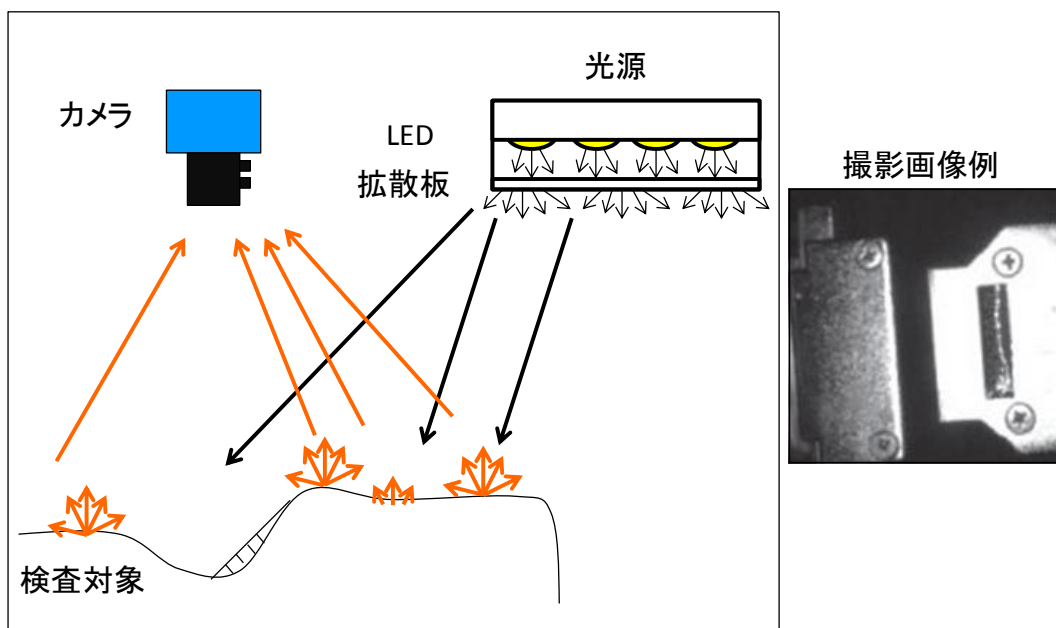


図 2-1 外観検査システム

表 2.1 マシンビジョン照明の種類

作業	内容
光源/色	LED (白, 赤, 緑, 青, 紫外, 赤外) / レーザー (赤, 緑, 青, 紫外, 赤外) / ハロゲン/キセノン/X線/液晶
形状	点/リング/バー/面/落射/ パターン照射
設置位置	バックライト/側面/無影

め、マシンビジョン用照明には、表 2.1 に記載するように様々な光源や形状、設置位置等が存在する。

2.2 電磁波としての光

前節ではマシンビジョンシステムの簡単な構成を説明した。本節では、電磁波として光を表現し、光の本来持つパラメータについて述べる。その上で、マシンビジョン用照明を例に出しながら簡略化した表現を導入する。通常のマシンビジョンにおいては光を電磁波として考える必要性は少ない。しかし、本研

究においては、後に詳述するホログラフィや提案法の特徴についての理解を深める為に必要である。

さて、光は電磁波であり、単一の光波 L は以下の式で表現される。

$$L(\mathbf{x}, t, \mathbf{E}, \mathbf{k}, \lambda, \phi) = \mathbf{E} \exp(i2\pi ct / \lambda + i2\pi \mathbf{k} \cdot \mathbf{x} / \lambda + \phi) \quad (2.1)$$

ここで、 \mathbf{E} は電場であり、複素ベクトルである。 \mathbf{x} は位置ベクトル、 t は時間、 \mathbf{k} は波数ベクトルであり、光の進行方向を示す。また、 λ は光の波長、 ϕ は位相を示す。本研究で議論する光は定常波である為、式(2.1)の指数部の第一項は今後記述しないものとする。また、偏光についてはごく一部を除き影響はない為、電場 \mathbf{E} は実数値をもつスカラー量 I として記述する。一方、照明光は多数の光波が混ざっており、各パラメータは分布を有している場合も多い。そこで分布を有する場合にはパラメータ α を $\tilde{\alpha}$ と表現することにする。

次に、光の伝播について述べる。Huygens の原理によれば、球面波の重ね合わせとして理解できる^[25]。光は本質的には空間上の全方向に伝播する球面波(図 2-2(a))であり、ある瞬間の光の波面の各点が新たな球面波の波源となり、全ての球面波の重ね合わせにより次の瞬間の波面の状態となる。これを繰り返すことで、波面は一定方向に進行する状態(図 2-2(b))や、屈折現象(図 2-2(c))、回折現象等、様々な光の伝播を理解することができる。

ここで、平面波の場合、レーザーのように光の位相 ϕ がそろっている場合、

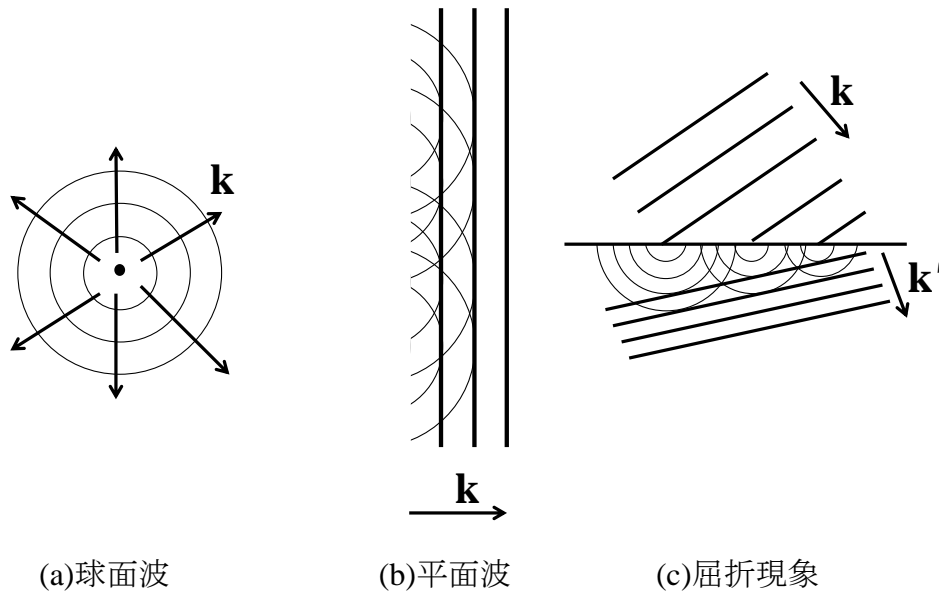


図 2-2 光の伝播

長く直進性を保つことができるが、LEDの場合、位相 ϕ がそろっておらず、波面が乱れ、光の進行方向は拡がりを持つことになる。

さて、式(2.1)は光の伝播の式であり、一方、本研究では、側面照明や縞パターンの投影等により空間上の位置に応じて光の特性が変化することが重要となる。そこで、光の伝播に関する記述のときは位置ベクトルを \mathbf{x} で表現し、光の空間分布が重要となる場合には位置ベクトルを \mathbf{X} で表わすことにする。これらを引数として表現すると

$$\tilde{L}(\mathbf{X}) = L(\tilde{I}(\mathbf{X}), \tilde{\lambda}(\mathbf{X}), \tilde{\phi}(\mathbf{X}), \tilde{\mathbf{k}}(\mathbf{X})) \quad (2.2)$$

となる。また、簡略化の為、本研究では、考察する範囲（視野や波長帯域）において均一とみさせる場合や、特筆する分布を有しておらず説明する事象に影響を与えない場合は引数を省略する。例えば、特定波長で一方向に伝播するレーザー光は

$$\tilde{L}(\mathbf{X}) = L(\tilde{I}(\mathbf{X}), \lambda, \phi, \mathbf{k}) \quad (2.3)$$

として表現する一方、広い角度で均一な発光を有する白色面発光LED照明をモノクロカメラで撮影する場合には

$$\tilde{L}(\mathbf{X}) = L(I) \quad (2.4)$$

として記述する。

2.3 物体表面での光の変化

物体表面に照射された光は、反射や吸収などの様々な反応が生じる。本節では、これらの現象について述べる。

光が伝播する空間の屈折率を n_1 、物体の屈折率を n_2 とする。簡単の為、物体表面中の特定位置 \mathbf{X} に、一定方向から一定波長の光が入射する場合を考える。図2-3に示すように、入射光は鏡面反射、拡散反射、透過（屈折）、吸収、散乱等の相互作用を行う。入射光、鏡面反射光、透過（屈折）光については、光の進行方向を波数 \mathbf{k} 、及び波数と物体表面の法線方向 \mathbf{n} とのなす角 θ の2つの表記を併用している。ここで、添字のinは入射光、Rは鏡面反射光、Tは透過

(屈折) 光, \mathbf{S} は拡散反射光を示している.

さて, 異なる屈折率を有する 2 つの領域の境界に光波が入射する場合, 反射と透過 (屈折) が生じる. 透過率と反射率は, Maxwell 方程式の境界条件から 2 つの領域の屈折率と入射角を用いた計算式として導出可能であり, Fresnel の式として知られている. しかし, 導出に要する計算は煩雑であり, 本研究の主旨を逸脱する為, 参考文献を示すに留める^[26]. しかし, この考察により反射光の角度, 及び屈折光の角度を導くことができる. ここでは結果のみを記載するが, 反射光の場合, 反射角は入射角と同一であり, θ , 及び \mathbf{k} は

$$\theta_R = \theta_{in} \quad (2.5)$$

$$L_R = L(I, \mathbf{k}) = I(\delta(\mathbf{k} - \mathbf{k}_R)) \exp(i2\pi \mathbf{k}_R \cdot \mathbf{x} / \lambda) \quad (2.6)$$

$$\mathbf{k}_R = \mathbf{k}_{in} - 2(\mathbf{k}_{in} \cdot \mathbf{n})\mathbf{n} \quad (2.7)$$

となる. ここで, δ はデルタ関数である. 実際の測定では, 理想的なデルタ関数ではなく,

$$I(\delta(\mathbf{k} - \mathbf{k}_R)) \sim A(\mathbf{k} \cdot \mathbf{k}_R)^a \quad (2.8)$$

とみなすことも多い^[27].

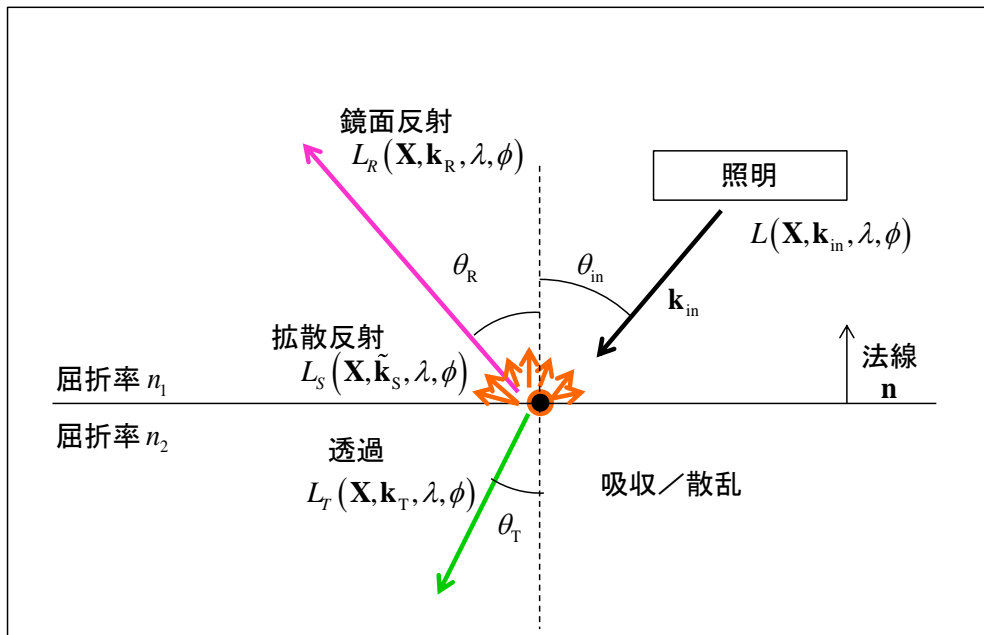


図 2-3 物体表面での相互作用

また、屈折角は

$$n_2 \sin \theta_T = n_1 \sin \theta_m \quad (2.9)$$

であり、Snell の法則として知られている。

次に、拡散反射であるが、これは物体表面上に微小な凹凸が存在する場合、その微小な凹凸によってランダムに反射を繰り返すことにより生じる。その為、拡散反射光の方向性は弱く、

$$L_S = L(I, \tilde{\mathbf{k}}) = (B\tilde{\mathbf{k}} \cdot \mathbf{n}) \exp(i2\pi\tilde{\mathbf{k}} \cdot \mathbf{x} / \lambda) \quad (2.10)$$

であり、 $\cos \theta$ 程度の反射角の拡がりをもつ。Lambert の余弦則として知られている^[28]。

さて、吸収は物質中の分子の励起等により光が吸収されることで、蛍光物質等、光として再照射するものもあるが、本研究の対象としない。また、散乱については電磁波と物質中の微粒子との相互作用によりレイリー散乱やミー散乱等の種類が存在する。カメラで受光するのは物体表面での反射であり、反射光量は鏡面反射と拡散反射の合計であるとすれば、式(2.7), (2.8), (2.10)より、反射光量は式(2.11)で表現されることがわかる。

$$I(\mathbf{k}_c) = A(\mathbf{k}_c \cdot \mathbf{k}_R)^a + B\mathbf{k}_c \cdot \mathbf{n} \quad (2.11)$$

ここで、 \mathbf{k}_c は視線方向（カメラの位置する方向）とし、 A は鏡面反射強度、 B は拡散反射強度であり、 \mathbf{n} は対象表面の法線方向、 \mathbf{k}_R は式(2.7)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。

拡散反射の寄与が大きい ($A \ll B$) 対象を観察する場合、拡散反射光は照射角度が広い為、カメラの位置に依らず安定した画像が得られる（図 2-4）。これは、式(2.11)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。このような方式では、表面上のテクスチャや陰影を測定している。

一方、鏡面反射が主となる ($A \gg B$) 光沢表面を観察する場合、観察位置に応じて大きく像が変化する。図 2-5 に光沢表面を持つ物体での例を示す。照明の光は物体表面に照射されるが、カメラで受光できる方向に向かう反射光は極一部（太線）であり、大半の反射光はカメラの存在しない方向に反射され（点線）、撮影画像には寄与しない。その為、画像処理に適した特徴量を含む画像を安定

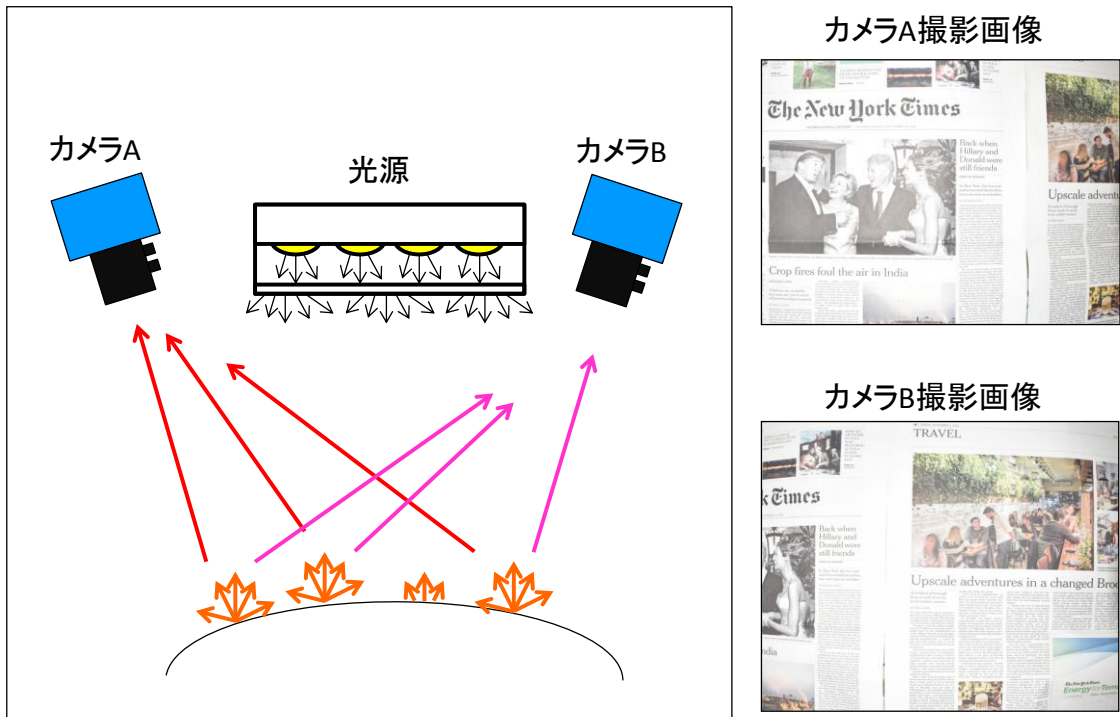


図 2-4 拡散反射物体での撮影

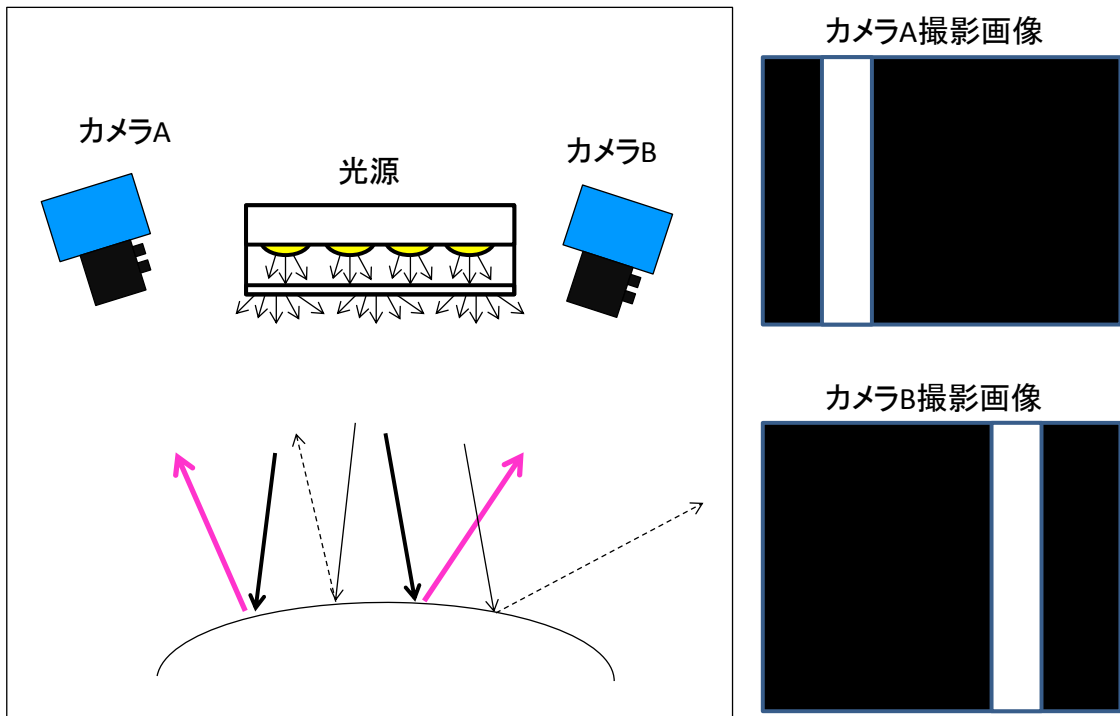


図 2-5 鏡面反射物体での撮影

に取得することが難しく，対象や状況に合わせてカスタマイズされた撮影システムが構築されることが多い。

2.4 表面検査システムで用いられる照明

ここでは照明の種類に着目して代表的な表面検査システムについて説明する。本章では，2.3 節で導入した表記法を用いながらそれぞれの照明の特徴について述べるとともに，他の照明との比較によって本研究で提案する HOE 照明の特徴を示す。

2.4.1 マシンビジョン用照明の種類

代表的な表面検査に用いるを図 2-6 に示す。ここで，分類にあるパッシブとは，照明は物体を照らすことを目的とし，照明自体には情報を付与しない照明群であり，検査に必要とされる撮影は 1 回であることが多い。アクティブは，照明そのものに情報が内包されており，撮影画像からその情報を抽出し，検査を行うことが可能である。アクティブ照明の多くは，照明に含まれる情報（投影パターン等）を変更した複数回の撮影が必要とされるケースが多い。図 2-6

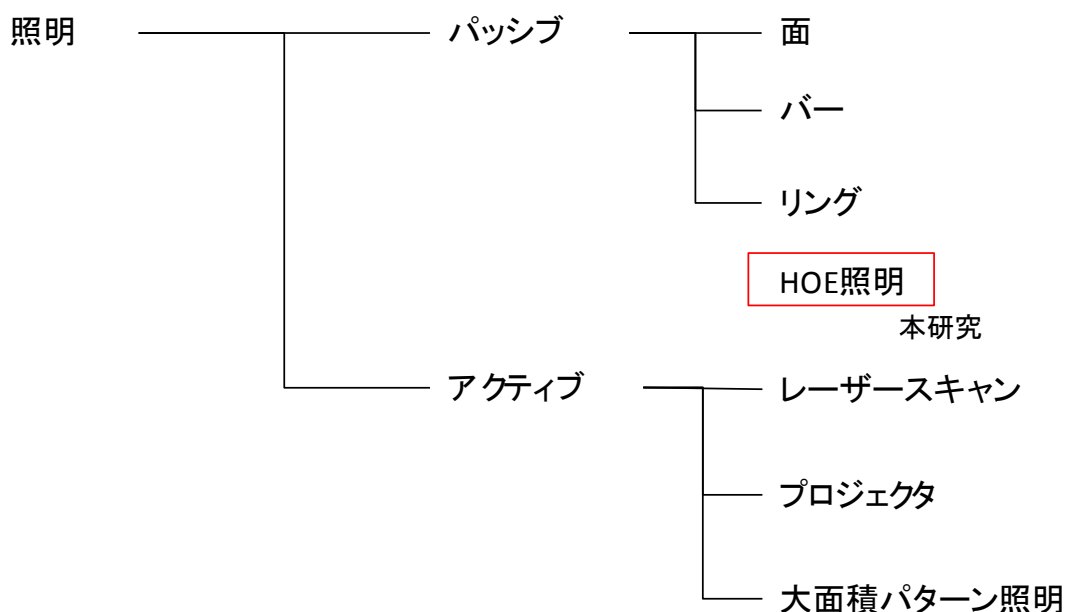


図 2-6 表面検査手法

では本研究で提案する HOE 照明を、パッシブとアクティブの中間に位置づけている。これは、HOE 照明は照明光自体に重要な情報が含まれているアクティブ照明であるが、1 回の撮影で検査可能である等、パッシブ照明のような特性も有する為である。

2.4.2 拡散反射が主となる表面の検査方式

まずは拡散反射が主となる表面の検査について述べる。スポット LED 照明や面発光照明、バー照明などのパッシブ照明により表面全体を照射する。LED 素子は光の位相がランダムである為、直進性を保つことは困難で、光は拡がり角を有する。例えば、日亜科学工業株式会社の白色 LED[NVSW119CT]の場合、照度がピークの半分以上となる範囲は、 $\pm 65[\text{deg}]$ であり^[29]、また、指向性を高めた Linkman 社製の砲弾型の白色 LED[LA504W3CA2C02]の場合、 $\pm 7.5[\text{deg}]$ である^[30]。

スポット LED 照明の場合、対象に照射される照度 I は、光源位置 \mathbf{X}_0 と照射位置 \mathbf{X} から求められる方向 \mathbf{k}_m に応じて変化する。その為、物体表面近傍での光は以下の式で表現されるとみなすことができる。

$$L = L(I(\mathbf{k}_m(\mathbf{X} - \mathbf{X}_0))) \quad (2.12)$$

散乱表面であることから、カメラで撮影する輝度も表面にテクスチャ等が存在しない場合、カメラの受光量は式(2.12)の照度 I に応じたものと考えられる。図 2-7 には、スポット LED 照明による物体への照射とカメラでの受光の様子を示している。この図では、光の照度を線の長さで表現しており、LED 光源の正面方向から離れるほど受光量が減少している。また、カメラ前面のレンズにより撮像素子上に集光する様子も合わせて示している。

次に、面発光照明について説明する。LED 素子を整列させ、拡散板等を用いてさらに拡がり角を大きくすることで、広い範囲で対象を均一に照射させるマシンビジョン用照明が構築される。照明には情報はあまり付与せず、以下のような形となる。

$$L = L(I) \quad (2.13)$$

対象表面に照射される光は、表面上での広い方向に拡散反射される。カメラのピントを対象表面に合わせることで、拡散反射光をカメラの撮像面に効果的に

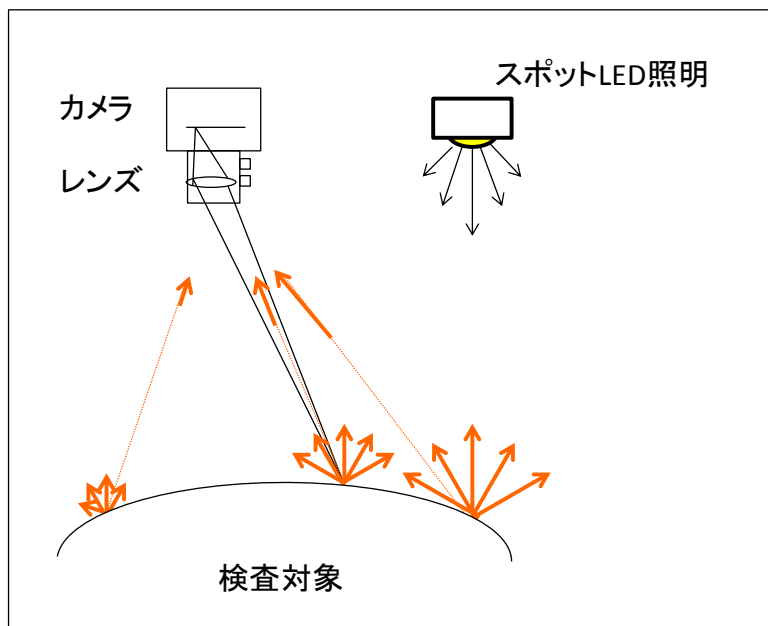


図 2-7 スポット LED 照明の指向特性

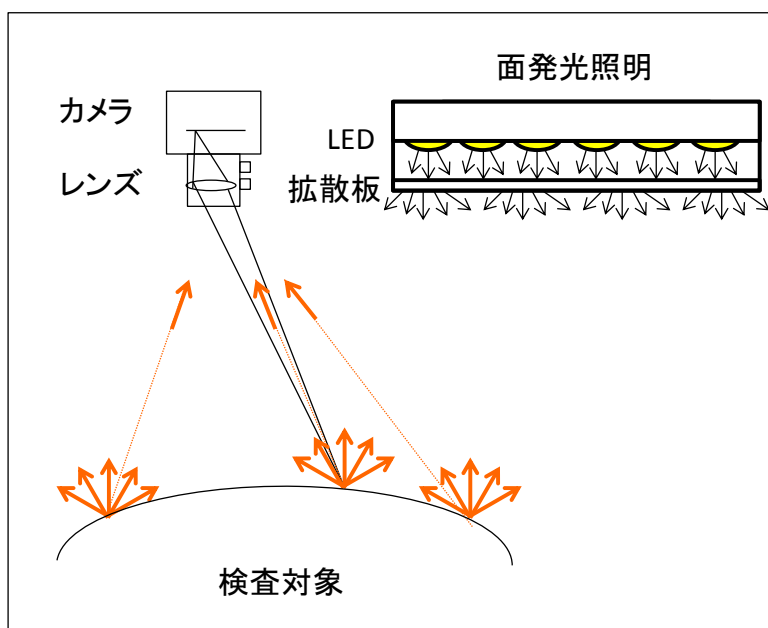


図 2-8 面発光照明での観察

集光し、光の吸収や凹凸による陰影の発生によるテクスチャ情報をカメラで取得することができる（図 2-8）。得られた画像から、物体表面での汚れや凹凸の激しいキズ、エッジ等を画像処理により抽出し、検査を行う手法が実施される。また、ピント情報から高さを取得するレンズ焦点法が存在する^{[31][32]}。

2.4.3 拡散反射が主となる表面の形状測定方式

拡散反射が主となる物体表面に対しては、三角測量による三次元計測により物体表面の凹凸を計測することが可能である。図 2-9 ではプロジェクタを用いた三次元計測の例を示している。プロジェクタ内の映像素子がレンズにより拡大され、物体表面上に投影される。物体表面にて、位置により濃淡が変化する投影像が生じる為、物体表面近傍での光は以下の式で表現されるとみなすことができる。

$$L = L(I(\mathbf{X}), \mathbf{k}_m(\mathbf{X} - \mathbf{X}_0)) \quad (2.14)$$

式(2.14)には光の方向 \mathbf{k}_m も存在するが、拡散反射が主となる表面では、 $I(\mathbf{X})$ によるパターン像のみを広い範囲で確認することができる。

さて、例えば $I(\mathbf{X})$ として、撮像素子位置 u での輝度が $A \sin(2\pi u/U)$ （ここで、 U はプロジェクタの横画素数）となる画像を投影すれば、投影された像の濃淡から撮像素子の位置を知ることができる。プロジェクタの場合、撮像素子位置と照射角度 θ_m を対応付けることができる。カメラ側の撮影画像中の位置から受光する光の角度 θ_c と、プロジェクターカメラ間の距離 W がわかれば、三角測量法により物体表面の位置 Z を計算することができる^[33]。拡散反射が主となる表面では、カメラは対象表面上での投影パターンを安定して観察することが

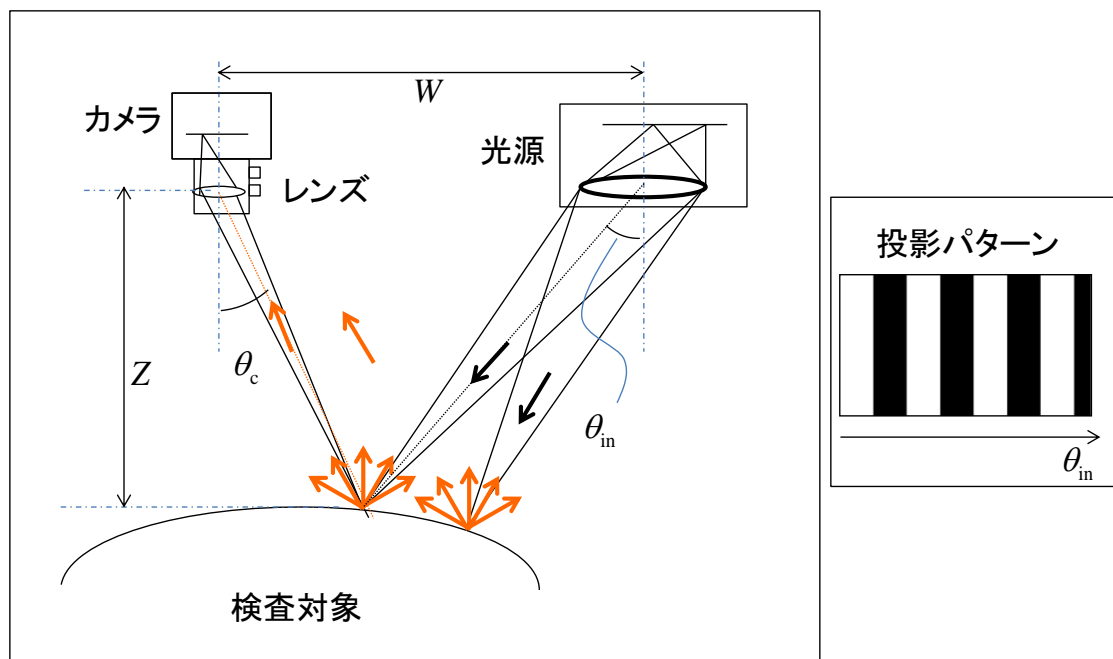


図 2-9 プロジェクタによる 3 次元測定

できる．また，複数のプロジェクタを用い，式(2.14)で表れる光線方向 $\mathbf{k}_{in}(\mathbf{X}-\mathbf{X}_0)$ に依らない RGB 照度 $I_{R,G,B}(\mathbf{X})$ を実現し，物体の奥行き位置に応じて色が変化する光線場^[34]や，RGB 照度に時間変化を与えることで，対象の運動状態によって異なる映像を提示するライトフィールドプロジェクタ技術^[35]が開発されている．しかしながら，カメラで受光する光は拡散反射光である為，表面の法線方向に関する情報は失われており，法線方向を正確に算出することは困難である．

2.4.4 光沢表面に対応する精密測定方式

対象が光沢表面を有する場合，プロジェクタのように微小光源から放射状に光線が広がる照明では，反射光は高い指向性を持って広がり，カメラ方向に向かう光は非常に少ない．従って，プロジェクタ光源は光沢表面の撮影には不適である．本項では，光沢表面でも測定できる方式を3つ簡単に述べ，その原理と課題を述べる．

まず，光ではなく，プローブによる接触により測定する方式がある．これは，Coulomb 力による物理的な測定であり，表面の反射は一切影響がない．しかし，対象表面を傷つける可能性があり，また，プローブ先端の1点での測定となり，面の測定には時間を要することが課題である．

次に，共焦点と呼ばれる方式である^{[36][37]}．これはピンホールを通ったレーザー光源をレンズにより1点に集光する方式であり，表面近傍での光の分布は

$$L = L(I(\delta(\mathbf{X})), \lambda) \quad (2.15)$$

であると考えることができる．模式図を図 2-10 に示す．対象がずれた場合，撮像素子側のピンホール位置で集光せず，撮像素子の受光量が著しく低下する．光学系全体をスキャンさせ，撮像素子の受光量が最大となる位置を記録することで，表面の高さを検出することができる．拡散反射，鏡面反射のどちらにも適用可能な手法であるが，1点の測定であり，また光軸に沿った方向にスキャンが必要である為，面の測定には時間を要することが課題である．これら課題に対して，高速化手法^[38]やスキャンレス測定法^{[39][40]}が提案されているが，顕微鏡を超える視野の測定には未だ課題が残る．

本項の最後にデジタルホログラフィによる測定^{[41]-[43]}を紹介する．物体に照射する光（物体光）は，物体表面の形状に応じて光路長が変化する．光路長の変

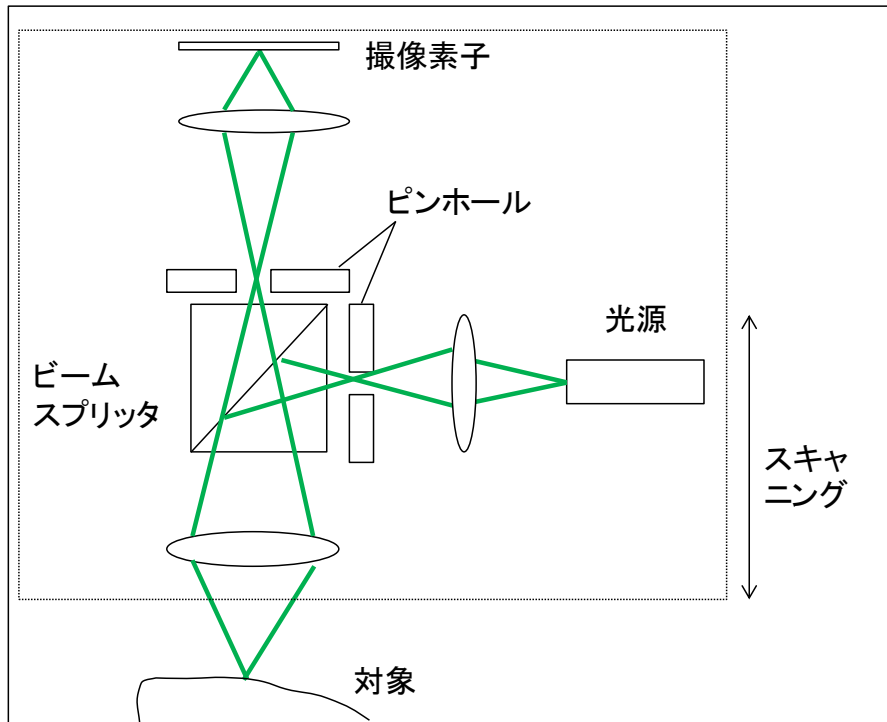


図 2-10 共焦点法

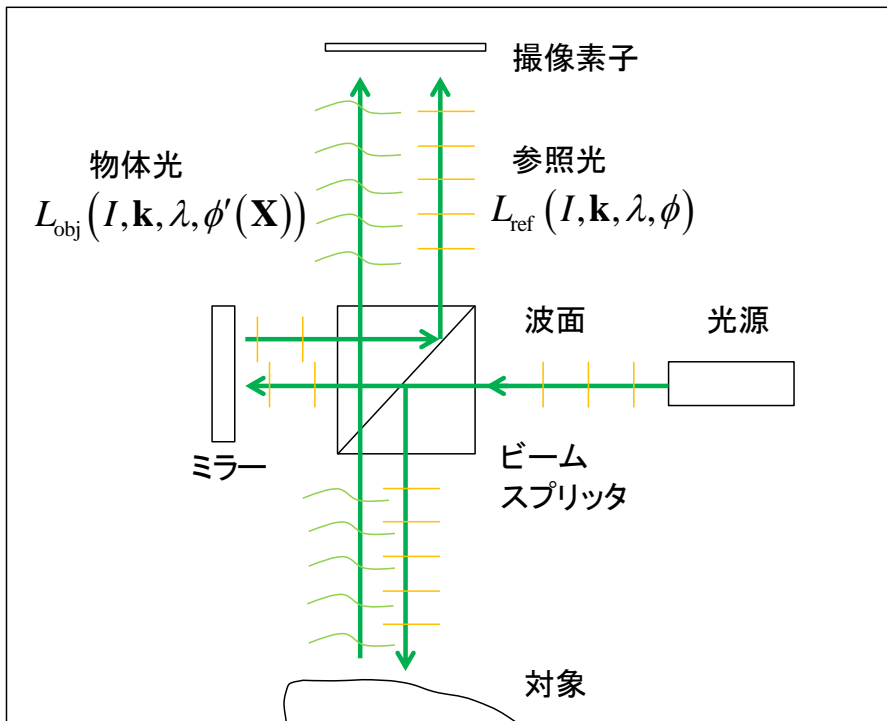


図 2-11 デジタルホログラフィ

化は、参照光の位相 ϕ と物体光の位相 ϕ' の差による光の干渉を生じさせる。カメラに向かう物体光を L_{obj} 、参照光 L_{ref} をとすれば

$$L_{\text{obj}} = L(I, \mathbf{k}, \lambda, \phi'(\mathbf{X})) \quad (2.16)$$

$$L_{\text{ref}} = L(I, \mathbf{k}, \lambda, \phi) \quad (2.17)$$

となる。ここで、位相 ϕ' は物体表面の位置により変化する為、式(2.16)では ϕ' は \mathbf{X} の変数であることを明記している。この2つの光の干渉による光の強度変化をカメラにより記録することで ϕ と $\phi'(\mathbf{X})$ の差から物体表面の位置を算出することができる。この方式は波長のオーダーで生じる位相変化を検出しており、ナノメートル精度の測定が可能である。位相差を検出するために、通常は複数枚の撮影が必要であるが、1回の撮影で測定する手法も提案されている^{[44][45]}。しかし、カメラにて干渉光を安定して受光する必要があるため、振動対策等の精密な撮影環境を要するが、撮影の安定化に関する研究も行われている^[46]。しかし、視野範囲、及び深さ方向の測定可能範囲が狭いため、裸眼目視で検査されるサイズの部品の表面検査には不適である。

2.4.5 大面積パターン照明を用いた検査方式

さて、鏡面反射が主となる(式(2.11)において、 $A \gg B$ となる)ような光沢表面を有する対象を観察する場合、カメラの視線方向 \mathbf{k}_c と、視線方向と交わる位置の対象表面の法線方向 \mathbf{n} に応じて、対応する入射光の方向 \mathbf{k}_{in} は大きく変化する。そこで、レーザー光を照射し、反射される位置で \mathbf{k}_{in} の情報を得る方式^{[47][48]} や、モアレ干渉法^{[49][52]} が適用可能である。また、広い面積で点光源を配置し、各点光源の明暗パターンを変化させることにより、カメラに撮像される光がどの点光源からの光であるかを識別することにより \mathbf{k}_{in} の情報を得る方式がある^{[14][18][53]}。本研究ではこの手法を大面積パターン照明と呼ぶことにする。

大面積パターン照明での観察例を図 2-12 に示す。照明光源として、大きい拡がり角を有する点光源が、検査対象とするエリアサイズよりも十分に広い面積において分布しており、各点光源の照度に変調可能なものを使用する。照明のパラメータとしては、照明位置により異なる照度のみである。 $z=0$ 平面上に照明を設置したとすれば、照明光源での光 L_{src} は

$$L_{\text{src}} = L(I_{\text{src}}(\mathbf{X})) \quad (2.18)$$

$$I_{\text{src}}(\mathbf{X}) = I_{\text{src}}(x, y, z) = I_{\text{src}}(x, y) \delta(z=0) \quad (2.19)$$

のように表現できる。なお、物体表面近傍での光 L_{obj} は、

$$L_{\text{obj}} = \int L(I_{\text{src}}(x, y)) dx dy \approx \text{const.} \quad (2.19)$$

であるが、光沢表面の場合、鏡越しにカメラで光源自体を観察している、とみなすことができるため、物体表面近傍での光 L_{obj} の分布は重要ではない。

さて、 $\mathbf{X}_c = (0, 0, 0)$ に位置するカメラから視線方向 \mathbf{k}_c で観察される像について考える。

$$\mathbf{X}_{\text{surf}} = l\mathbf{k}_c = (lk_x, lk_y, lk_z) \quad (2.20)$$

の位置で物体表面に達するとし、 $\mathbf{X} = (x, y, 0)$ の位置に光源のある光を観察するとすれば、

$$\mathbf{k}_{\text{in}} = \frac{1}{(lk_x - x_0)^2 + (lk_y - y_0)^2 + l^2 k_z^2} (lk_x - x_0, lk_y - y_0, lk_z) \quad (2.21)$$

として \mathbf{k}_{in} を計算し、式(2.7)により法線方向 \mathbf{n} を得ることができる。しかしなが

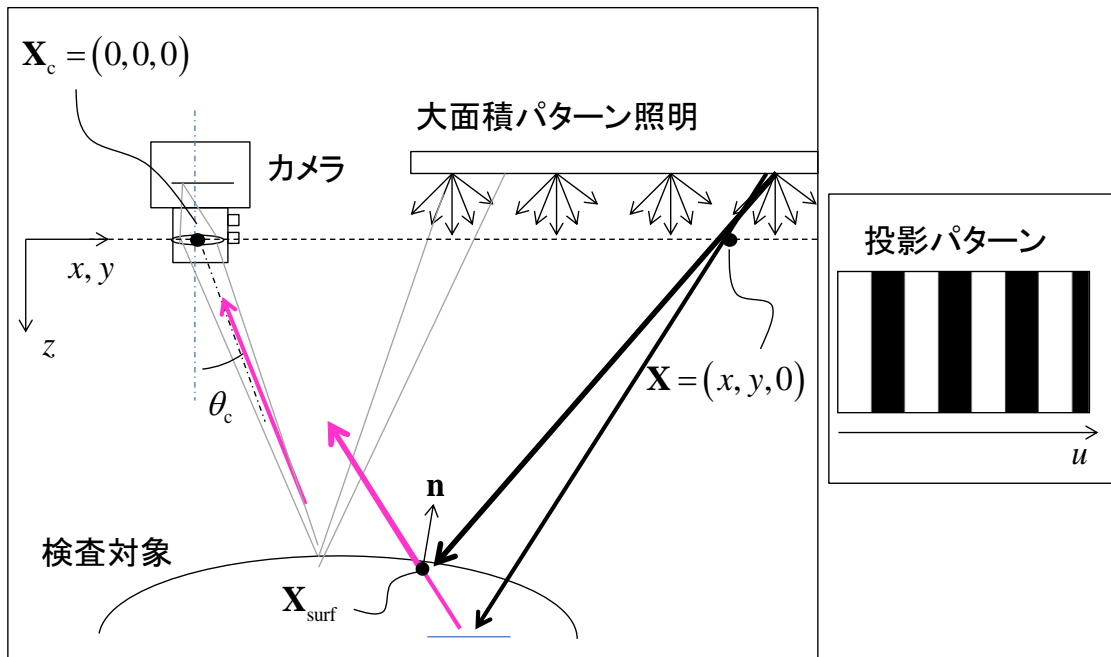


図 2-12 大面積パターン照明による検査方式

ら，式(2.19)中の l は求めることが出来ず，法線方向 \mathbf{n} は不定である（図 2-12 中の青細線参照）．したがって，この方式では表面がなめらか（近傍では l の変化は小さい）であると仮定した上で，周辺との法線方向の比較が可能である，ということに留まる．また，ピントに関する問題も存在する．ここで示した方式は，「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 2-12 の黒細線のように，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 \mathbf{X}_0 が不定となるということであり，この方式では大きな問題となる．その為，実際のケースで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．

2.4.6 HOE 照明を用いた検査方式

次に本研究での提案法である，HOE 照明を用いた方式について述べる．光学レイアウトは図 2.13 となる．詳細は第 3 章にて述べるが，光源からの光が HOE を通過する際に生じる回折光は，光の波長毎に異なる角度を有する．この特性を利用することにより，色毎に異なる照射角度を有する広い平行照明光を生成することができる．すなわち，HOE 照明により物体に照射される光は

$$L = L(I, \mathbf{k}_{in}(\lambda)) \quad (2.21)$$

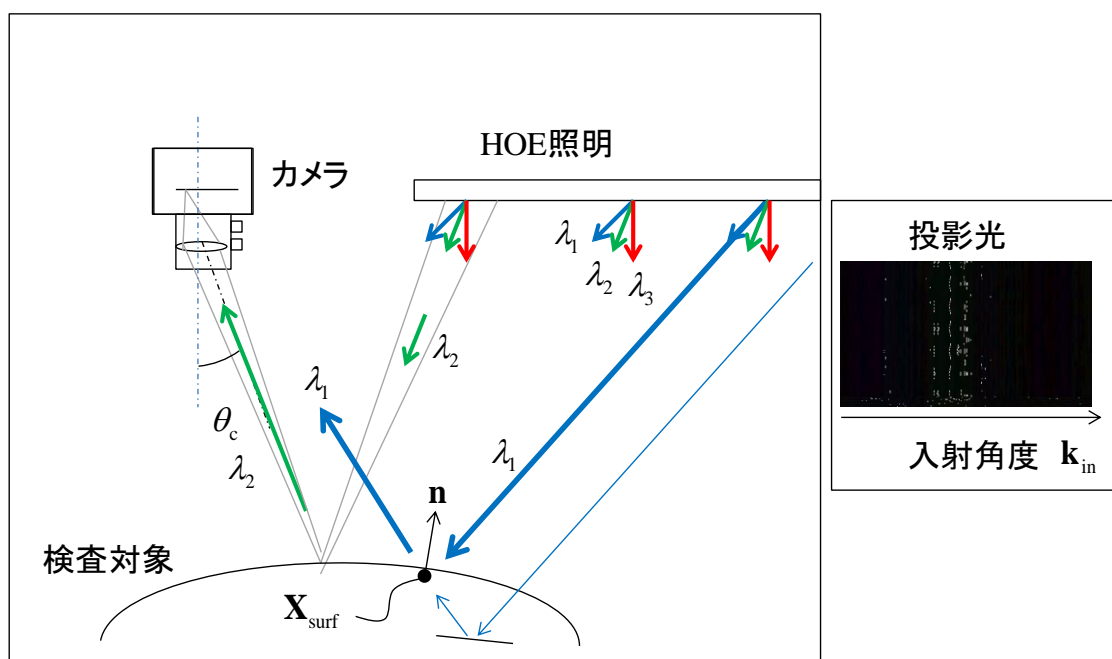


図 2-13 HOE 照明による検査方式

と表現することができる。2.4.5 項の方式では、照明位置から推定するしかなかった \mathbf{k}_{in} が波長 λ の関数として明示的に式に入っていることが重要である。波長 λ は、カラーカメラにより色相という近似情報であるが取得することができる。その為、撮影画像から色相の計算を通して \mathbf{k}_{in} を取得することができ、式(2.12)により法線方向を計算できる。

図 2-13 中の青細線で示すように、この方式では式(2.19)中の l が変化した場合であっても、波長が同一であれば、この方式では重要ではない光源位置が変化するだけで式(2.12)に全く影響を与えない。また、対象にピントあわせた場合、方向変化による波長の混在は生じるものの、色相への影響は少ない。このことについては、4.5 節にて改めて記載する。この特性により、HOE 照明の場合、対象にカメラをピントを合わせるといふ、外観検査に理想的な条件での検査が可能である。

2.5 まとめ

本章では、マシンビジョン照明の違いについて、電磁波としての光が本来の持つパラメータをベースとして説明を行った。通常のマシンビジョンにおいては光を電磁波として考える必要性は少ないが、本章での内容は、後に詳述するホログラフィや提案法の理解を深める為に必要である。まず、電場ベクトルや波数ベクトル、位相を含んだ光波の表現を記載し、その上で照明の特徴を明確にする為の略表現について述べた。次に、物体表面での光の相互作用について、特に鏡面反射と拡散反射について説明した。

また、表面検査システムで用いられる照明について、拡散反射が主となる表面を持つ対象と鏡面反射が主となる表面（光沢表面）を持つ対象とに分けて説明を行った。この説明では、光の表現を統一することで、それぞれの光の持つ情報を明確にした。これにより、面発光照明は照度が重要なパラメータであり、プロジェクタを用いた三次元計測では照度の空間分布が重要なパラメータとなっていることを確認した。

また、共焦点方式では、照度のデルタ関数的振る舞いが、デジタルホログラフィでは位相変調が重要な情報を含むことを確認した。共焦点方式、及びデジタルホログラフィは鏡面反射の測定が可能であるが、検査エリアが狭く、裸眼目視で検査しているサイズの部品の表面検査には不適である。

さらに、現在の光沢表面の外観検査で複数のシステムが提案されている大面積パターン照明の場合、光源位置での照度の空間分布を元にして、入射光線の方法を計算し、外観検査を行うことを確認した。

最後に、提案法で用いる HOE 照明の場合、照明光の光線方向が光の波長の関数となる、という他の照明にはない特徴を有していることを述べた。提案法では、1 枚の撮影画像の色相から入射光線の方法を取得でき、光沢表面の外観検査が可能である。色相を用いて光沢表面を検査する提案法は、従来のマシンビジョンシステムとは全く異なっている。以降の章では、HOE 照明を用いたシステムを実際に構築し、その特性や課題について検討していく。

第3章 ホログラフィ

本章では、提案法で使用する照明の重要構成要素であるホログラフィック光学素子(Holographic Optical Element, HOE), 及びホログラフィ技術全般について説明する。まず、回折およびホログラフィの基本原理について 3.1 節にて述べる。特に、本研究において非常に重要な役割を果たす色分散について、屈折光学系と回折光学系での特性の違いを詳述する。次に、3.2 節では、ホログラムの種類と特性を概説した上で、本研究で HOE の材料として用いているフォトポリマーでの記録の原理について説明を行う。

さて、本研究で提案する方式は HOE を除いて通常のマシンビジョンシステムの構成部品で構築できる。その為、用いる HOE を大量かつ高速に製作できれば、HOE 照明は通常のマシンビジョンシステムと同程度の費用で構築することができる。しかし、ホログラフィでは光の干渉縞を記録する為、作成時の振動対策が重要であり、一般的なホログラムの作成法では作成時間が遅く、大面積化が困難である。そこで本研究ではコリニア方式と Q スイッチパルスレーザを用い、光学系を最適化することにより、非常に振動に強く、大面積で高速に HOE を作成できる HOE プリンタを開発した。3.3 節では、HOE プリンタで採用している、高速な HOE の作成を可能にする技術について説明する。3.4 節では、本研究で使用する HOE の特性に関する調査実験について述べる。本章の最後として、3.5 節に考察を述べる。

3.1 ホログラフィの原理

ホログラフィは光の干渉パターンを記録し、元となる光を再生することのできる技術である。ホログラフィを用いることで非常に自然な 3 次元的な像を裸眼にて視認することも可能である。本節ではホログラフィの原理について述べる。まず、3.1.1 節では基本原理である回折現象について、1 次元薄型スリットを用いて説明する。次に、3.1.2 節にて本研究において非常に重要な役割を果たす色分散について、屈折光学系と回折光学系での特性の違いを詳述する。3.1.3

節では、ホログラフィによる像再生を式により説明する。

3.1.1 回折現象

回折とは、進行する波が、位相や強度を変調させ、さらにその変化量が空間的に変化する媒体を通過するとき、変調された光が Huygens の原理により重なり合うことで、進行波面が変化する現象である。

ここでは薄型回折格子の例で回折現象を説明する。薄型回折格子では通常の屈折面の場合とは異なり、図 3-1 の回折格子の位置において、光路長がその前後で不連続になる。回折された光線には、単位周期 Λ あたり波長 λ の m 倍の光路差が生じると考えられる。ここで、 m を回折次数と呼ぶ。入射光の角度を θ_{in} 、回折された光の角度を θ_{out} とすれば、光路差 Φ の 1 周期での差分は

$$\Delta\Phi = \Phi_2 - \Phi_1 = \Lambda(n_2 \sin \theta_{out} - n_1 \sin \theta_{in}) = -m\lambda \quad (3.1)$$

となる^[54]。ここで、 n_1 と n_2 はそれぞれ前後の媒質の屈折率である。ここで、媒質の屈折率を $n_1 = n_2 = 1$ とし、回折面に対して垂直に入射する ($\theta_{in} = 0$) 場合はよく知られた Bragg の法則となる。

$$\sin \theta_B = m\lambda / \Lambda \quad (3.2)$$

この式は、光の方向と波長とを結びつける、本研究において最も重要な式となっている。光沢表面上の不良により表面の法線角度が変化すると、それに応じ

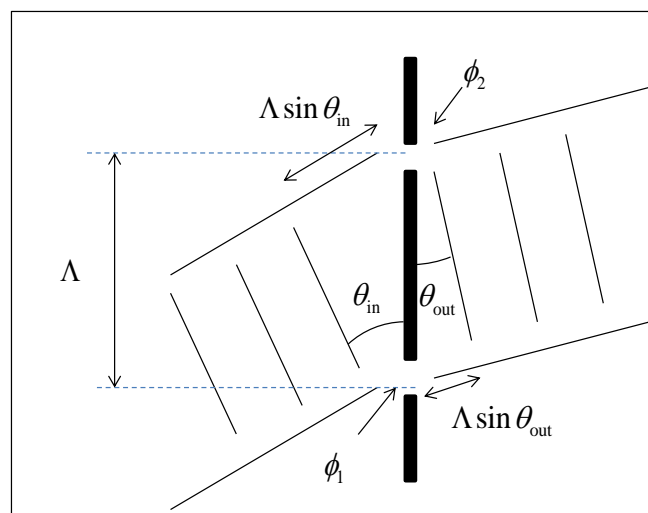


図 3-1 回折現象

て対応する照明光の角度も変化する。HOE 照明では、照明光として用いる回折光は式(3.2)の関係を有しており、不良部分のみ色が変わる、という特徴的な機能が実現される。

3.1.2 回折による色分散

さて、波長により光線の角度が変化する現象は色分散と呼ばれ、レンズやプリズム等の屈折物体でも一般に存在する。本節では、宮前^[55]の説明に基づき、屈折と回折との類似性から回折での色分散について考察する。物体の色分散を評価する指標が Abbe 数 ν が存在する。まず、屈折の場合の薄プリズムの頂角 δ と光線の偏角 ε について考える (図 3-2)。プリズムの屈折率を n としたとき、頂角と偏角の関係は

$$\varepsilon = (n-1)\delta \quad (3.3)$$

となり、Abbe 数 ν は波長による ε の変化として、

$$\frac{1}{\nu} = \frac{d\varepsilon}{\varepsilon} = \frac{dn}{n-1} \quad (3.4)$$

で定義される。頂点から光線の入射点までの長さを l とすると、 $\varepsilon l = (n-1)\delta l$ は空気を屈折率 n の媒質で置き換えたときの光路長差を表わしており、式(3.4)は光路長差の相対変化とみなすことができる。そこで、空気中にある回折面に対

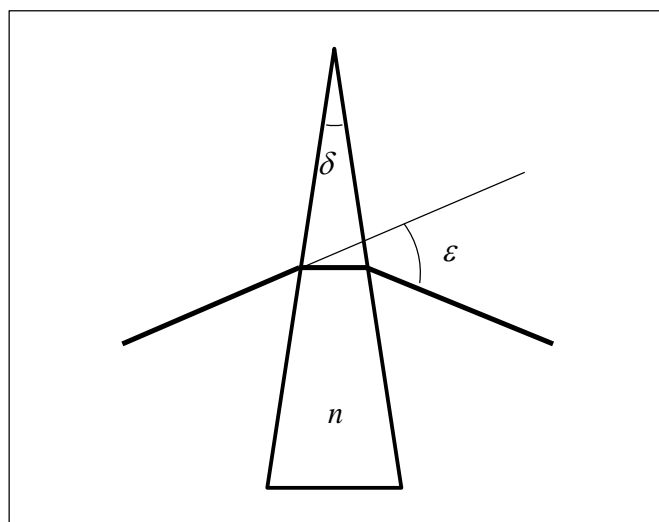


図 3-2 薄プリズムの頂角と偏角

しても波長が変化するときの光路長差 Φ で Abbe 数を定義すれば

$$\frac{1}{\nu} = \frac{d\Phi}{\Phi} = -\frac{d\lambda}{\lambda} \quad (3.5)$$

となり，屈折現象での $(n-1)$ と回折現象での λ が対応していることがわかる．

さて，実用上，光線を指定して具体的な Abbe 数が一般的に用いられている．たとえば Abbe 数 ν_d はフラウンホーファー d 線 ($\lambda_d = 587.56$ [nm])，F 線 ($\lambda_F = 486.1$ [nm])，C 線 ($\lambda_C = 656.3$ [nm]) に対する物体の屈折率をそれぞれ n_d ， n_F ， n_C としたとき，

$$\nu_d = \frac{n_d - 1}{n_F - n_C} \quad (3.6)$$

で定義される．さて，薄プリズムでの偏角の考察から，回折現象での Abbe 数 ν_d は，

$$\nu_d = \frac{\lambda_d}{\lambda_F - \lambda_C} = -3.453 \quad (3.7)$$

となる．ガラス等，通常の屈折型光学素子の Abbe 数は $\nu_d = 50$ 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．

大きな色分散は，回折光の角度が微小に変化したとき，その波長が大きくことなることを示している．これは，光沢表面上の不良による微小な角度変化を色により検出する，という提案法にとって，回折光学素子が非常に好ましい特性を有することを意味する．

3.1.3 ホログラフィ

次にホログラフィについて述べる．ホログラフィの原理は以下のとおりである．ここで，ホログラフィは技術を，ホログラムはホログラフィにより記録される物体を指すものとする．

ホログラフィでは，物体からホログラム面に到達する波面（物体光と呼ぶことにする）

$$L_{\text{obj}}(I_{\text{obj}}(\mathbf{X}), \phi_{\text{obj}}(\mathbf{X})) = I_{\text{obj}}(\mathbf{X}) \exp(i\phi_{\text{obj}}(\mathbf{X})) \quad (3.8)$$

と、光源から直接ホログラム面に到達する波面（参照光）

$$L_{\text{ref}}(I_{\text{ref}}(\mathbf{X}), \phi_{\text{ref}}(\mathbf{X})) = I_{\text{ref}}(\mathbf{X}) \exp(i\phi_{\text{ref}}(\mathbf{X})) \quad (3.9)$$

との位相差が干渉縞として記録され、ホログラムになる。

図 3-3 にホログラム作成時の様子を示す。さてここで、物体光だけをホログラム面で直接検出するとすると、その時の光強度は、

$$|L_{\text{obj}}|^2 = L_{\text{obj}} L_{\text{obj}}^* = I_{\text{obj}}^2(\mathbf{X}) \quad (3.10)$$

となり、通常の撮影と同様に光強度のみが記録される。ここで、 L_{obj}^* は L_{obj} の複素共役である。

次に、物体光と参照光が同時に照射する場合を考える。その場合、光強度は

$$\begin{aligned} |L_{\text{obj}} + L_{\text{ref}}|^2 &= |L_{\text{obj}}|^2 + |L_{\text{ref}}|^2 + L_{\text{obj}} L_{\text{ref}}^* + L_{\text{obj}}^* L_{\text{ref}} \\ &= |I_{\text{obj}}|^2 + |I_{\text{ref}}|^2 + I_{\text{obj}} I_{\text{ref}} \exp(i(\phi_{\text{obj}} - \phi_{\text{ref}})) \\ &\quad + I_{\text{obj}} I_{\text{ref}} \exp(i(-\phi_{\text{obj}} + \phi_{\text{ref}})) \end{aligned} \quad (3.11)$$

となり、物体光の位相情報 ϕ_{obj} が残ることがわかる。この光強度に比例する振幅透過率として記録されたとすると、その媒体に参照光を照射したときの再生光 $L_{\text{reconstruct}}$ は

$$\begin{aligned} L_{\text{reconstruct}} &= A |L_{\text{obj}} + L_{\text{ref}}|^2 L_{\text{ref}} \\ &= A \left(|L_{\text{obj}}|^2 + |L_{\text{ref}}|^2 \right) L_{\text{ref}} + |L_{\text{ref}}|^2 L_{\text{obj}} + L_{\text{obj}}^* L_{\text{ref}} L_{\text{ref}} \\ &= A \left(|I_{\text{obj}}|^2 + |I_{\text{ref}}|^2 \right) I_{\text{ref}} \exp(i\phi_{\text{ref}}) \\ &\quad + |I_{\text{ref}}|^2 I_{\text{obj}} \exp(i\phi_{\text{obj}}) + |I_{\text{ref}}|^2 I_{\text{obj}} \exp(i2\phi_{\text{ref}} - i\phi_{\text{obj}}) \end{aligned} \quad (3.12)$$

となる。ここで、第 2 項に着目すると、物体光 L_{obj} が再現されていることがわかる。つまり、ホログラムは、再生光を照射することで記録した物体光を再生可能ということになる。物体の立体表示の応用例^{[56][57]}が有名であるが、また、X 線光学で活用されるフレネルゾーンプレート^[58]や、CD/DVD のピックアップレンズ^[59]にも用いられる。また、空間光変調器を用い、動的なホログラムを作成することで 3D 立体動画の表示を可能とする研究も行われている^[60]。また、遠方で焦点を結ぶ凹面ミラーをホログラムで作成した、ウェアラブル MR 表示装置も開発され^[61]、Microsoft 社 Hololens も同様の技術を用いている^[62]。

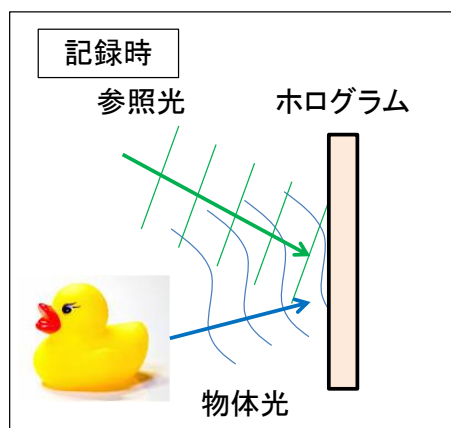


図 3-3 ホログラムの記録

3.2 ホログラムの種類

ホログラムには表 3.1 のように様々なタイプが存在する．本節では，これらのホログラムについて，回折効率や回折角度，波長選択性などの特徴を含めて説明する．ここで，回折効率 η は，入射光の強度 $|I_{in}|^2$ と回折光の強度 $|I_{ref}|^2$ との比

$$\eta = \frac{|I_{ref}|^2}{|I_{in}|^2} \quad (3.13)$$

で定義される．回折効率が高いほど，入射光を効率的に回折光に変換していることを意味し，回折光を照明光として用いる提案法では，回折効率が高いほうが好ましい．

さて，ホログラムの分類として，光の振幅 I を場所により変調させ，回折を

表 3.1 ホログラムの種類

作業	内容
変調	振幅 / 位相
厚さ	薄い / 厚い(体積ホログラム)
再生光の方向	反射型 / 透過型
材料/作成方法	フォトポリマー / リソグラフィ エンボス / 電子ホログラム

得る振幅変調と、位相 ϕ に対して変調を行う位相変調とが存在する。図 3.1 に示されているスリットの例はスリット箇所以外では振幅が $I=0$ となる、振幅変調である。振幅変調では入射光の強度を減衰させる為、一般に回折効率は振幅変調に比べ位相変調の方が優れている。

次に記録する媒体の厚さに対し、薄いホログラムと厚いホログラム（体積ホログラム）という分類が存在する。これらの区別は、一般的に次式で定義されるパラメータ Q より判断する^[63]。

$$Q = \frac{2\pi\lambda d}{n\Lambda^2} \quad (3.14)$$

ここで、 λ は光の波長、 d はホログラム媒体の厚さ、 n は平均的なホログラム媒体の屈折率、 Λ は式(3.1), (3.2)でも表れている格子間隔である。 Q が1より大きい場合を厚いホログラム（体積ホログラムと呼ぶ）、逆に1より小さい場合を薄いホログラムに対応している。

薄いホログラムの場合、光が十分に变調されることがないため、回折効率 η は堆積ホログラムに比べて小さく、振幅変調の場合には

$$\eta_{\max} = 0.0625 \quad (3.15)$$

であり、位相変調の場合でも

$$\eta_{\max} = 0.339 \quad (3.16)$$

に留まることが知られている^[64]。薄いホログラムの例は、クレジットカードのセキュリティ等で用いられるエンボスホログラムである^[65]。これは非常に細かい凹凸を持った金型を記録媒体に押し付けて作成するものであり、量産性が高く、通常の複写機ではコピーできないため広く使用されている。

一方、体積ホログラムは理論上 100[%]の回折効率が達成できる等、効率のよい回折が可能である。本研究では、検査用照明として用いるため、回折光の照度を十分高くする目的から、回折効率の高い位相変調の体積ホログラムを用いる。

さらに、再生光の方向により、透過型ホログラムと反射型ホログラムに分けることが出来る。これらは再生照明光をホログラムに入射したときの、再生光が生じる位置による分類であるが、どちらも高い回折効率を実現することがで

きる。一方、回折が生じるときの再生照明光の制限（選択性），特に波長選択性が大きく異なっている。ここでは，それぞれのホログラムの角度選択性，波長選択性に焦点をあて説明を行う。

透過型ホログラムは，ホログラム面に対し，参照光と同じ方向から物体光を照射することで作成する。この場合，再生照明光をホログラムに照射したとき，光はホログラムを透過し，再生照明光と反対の方向に像が再生される。この様子を図 3-4 に示している。

Bragg 条件から外れた場合の回折効率に関する理論は，Kogelnik により結合波理論(Coupled wave theory)としてまとめられた^[66]。結合波理論によれば，透過型ホログラムでの Bragg 角 θ_B の回折効率は

$$\eta_B = \sin^2 \Phi \quad (3.17)$$

$$\Phi = \frac{\pi \Delta n d}{\lambda \cos \theta_B} \quad (3.18)$$

となる^{[64][66]}。ここで， Δn は屈折率の変化量， d はホログラムの厚さである。式(3.17), (3.18)により，

$$2\Delta n d = \lambda \cos \theta_B \quad (3.19)$$

という条件が満たされるとき，理論上，回折効率 $\eta_B = 1.0$ ，すなわち，入射光の全てを回折光に変換することができることがわかる。

次に，入射光が Bragg 条件からずれたときの回折効率について述べる。このとき，回折効率 η は以下の式に従って減少する^[64]。

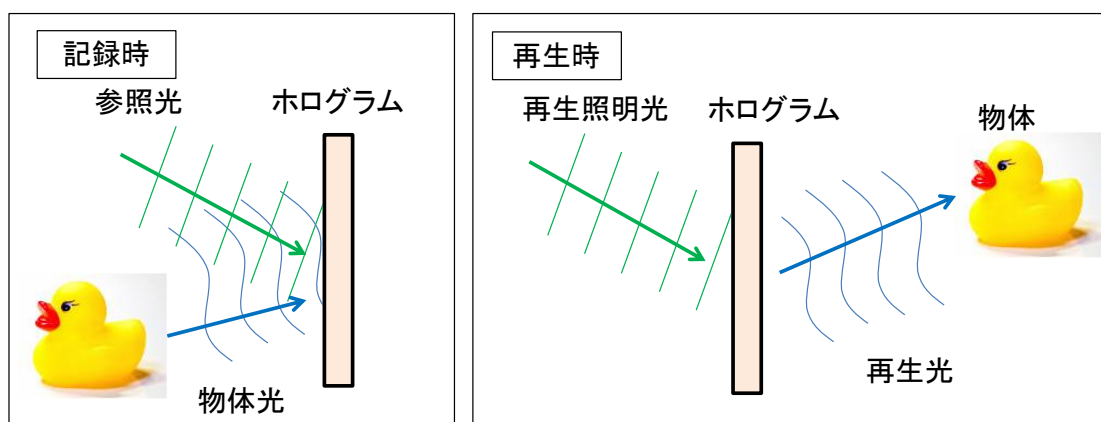


図 3-4 透過型ホログラム

$$\eta = \frac{\sin^2(\Phi^2 + \Xi^2)^{1/2}}{(1 + \Xi^2 / \Phi^2)} \quad (3.20)$$

ここで、 Ξ は Bragg 条件に対する角度、及び波長のずれをパラメータとして有する。角度のずれに関して表現する場合、

$$\Xi = \frac{\pi d}{\Lambda} \Delta\theta \quad (3.21)$$

となり、波長のずれに関しては

$$\Xi = \frac{\pi d}{2\Lambda^2 n \cos \theta_B} \Delta\lambda \quad (3.22)$$

という形で表現される。式(3.20)は回折効率の減少、つまり、角度選択性および波長選択性を示している。そこで、式(3.20)がどのような振る舞いをするかを検討する。式(3.20)は、以下のように変形できる。

$$\begin{aligned} \eta &= \frac{\sin^2(\Phi^2 + \Xi^2)^{1/2}}{(1 + \Xi^2 / \Phi^2)} \\ &= \frac{1}{\Phi^2} \left[\frac{\sin(\Phi^2 + \Xi^2)^{1/2}}{(\Phi^2 + \Xi^2)^{1/2}} \right]^2 \\ &= \alpha \text{sinc}^2 \beta \end{aligned} \quad (3.23)$$

ここで $\text{sinc} \beta = \sin \beta / \beta$ であり、図 3-5 のように変化し、 $\beta = 80[\text{deg}]$ で半値に、 $\beta = 180[\text{deg}]$ でゼロとなる。

透過型ホログラムの場合、回折効率 η が 0 になるときの入射角度ずれ量を $\Delta\theta$ とすると、

$$\Delta\theta = \frac{\lambda(n^2 - \sin^2 \theta_B)}{d \sin \theta_B \cos \theta_B} \quad (3.24)$$

で近似的に与えられる^[56]。式(3.24)に基づき、HOE 照明に用いた条件での角度選択性を計算することができる。波長 $\lambda = 532[\text{nm}]$ の光を厚さ $d = 16[\mu\text{m}]$ で平均屈折率 $n = 1.49$ のホログラムに垂直に入射し、 $\theta_B = 13.5[\text{deg}]$ の方向に回折するとした場合、式(3.24)により $\Delta\theta = 12.3[\text{deg}]$ が得られる。また、回折効率が半値

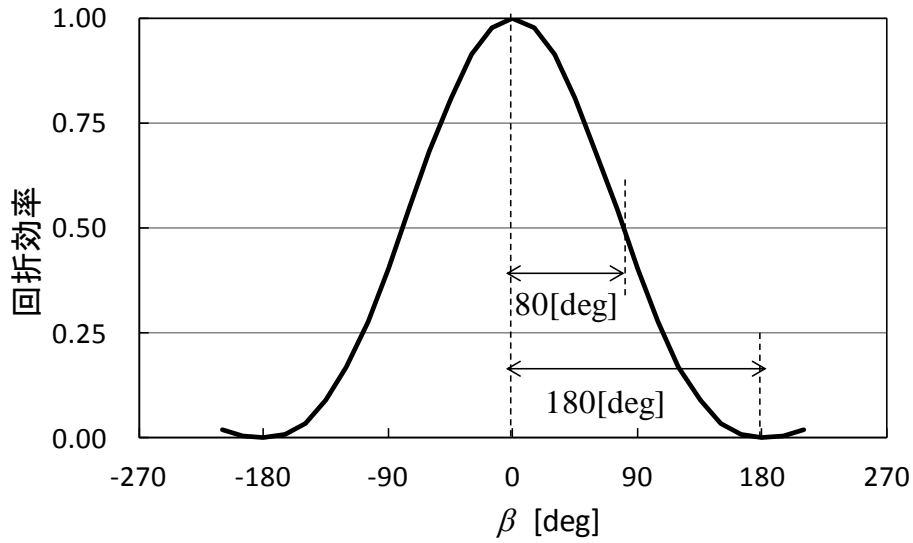


図 3-5 回折効率の変化

となる角度 $\Delta\theta_{1/2}$ は図 3-5 の関係から $\Delta\theta_{1/2} = 5.5[\text{deg}]$ ということがわかる。

同様に、回折効率 η が 0 になる波長のずれ量 $\Delta\lambda$ は

$$\Delta\lambda = \frac{\lambda^2}{d \left(n - (n^2 - \sin^2 \theta_B)^{1/2} \right)} \quad (3.25)$$

であり、式(3.2)により、中心となる回折角度と Bragg 角とのずれ $\delta\theta$ は

$$\delta\theta = -\sin \theta_B \Delta\lambda / \lambda \quad (3.26)$$

となる^[56]。先ほどの条件と同じ ($\lambda = 532[\text{nm}]$, $d = 16[\mu\text{m}]$, $n = 1.49$, $\theta_B = 13.5[\text{deg}]$) の場合, $\Delta\lambda = 961[\text{nm}]$, $\Delta\lambda_{1/2} = 427[\text{nm}]$, $\delta\theta = -24.2[\text{deg}]$, $\delta\theta_{1/2} = -10.7[\text{deg}]$ となる。

次に、反射型ホログラムについて説明する。反射型ホログラムは、ホログラム面に対して反対の方向から参照光と物体光を照射することで作成する。この場合、再生照明光をホログラムに照射したとき、光はホログラムを反射し、再生照明光と同じ方向に像が再生される。この様子を図 3-6 に示している。反射型ホログラムの重要な特性は、波長選択性が非常に高いことである。回折効率 η が 0 になる波長のずれ量 $\Delta\lambda$ は

$$\Delta\lambda = \frac{\lambda^2}{d \left(n + (n^2 - \sin^2 \theta_B)^{1/2} \right)} \quad (3.27)$$

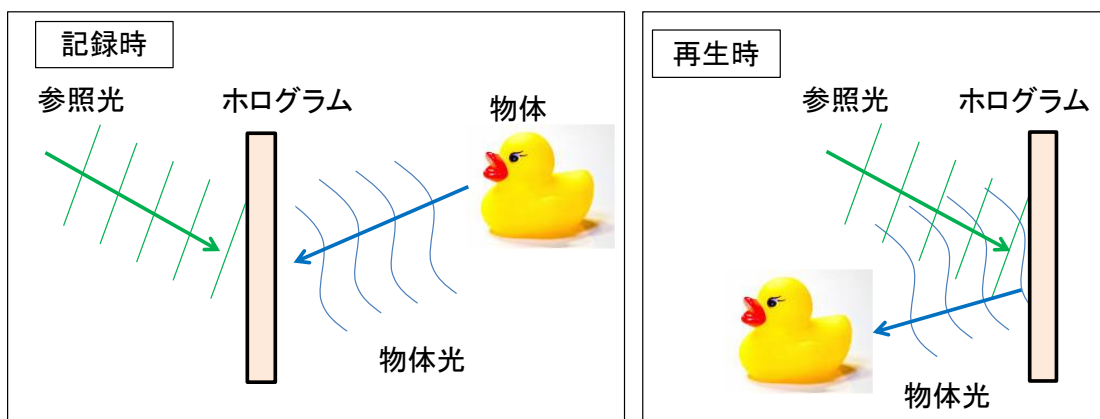


図 3-6 反射型ホログラム

であり、先ほどの条件と同じ ($\lambda = 532[\text{nm}]$, $d = 16[\mu\text{m}]$, $n = 1.49$, $\theta_b = 13.5[\text{deg}]$) の場合, $\Delta\lambda = 6.0[\text{nm}]$, $\Delta\lambda_{1/2} = 2.7[\text{nm}]$, $\delta\theta = -0.2[\text{deg}]$, $\delta\theta_{1/2} = -0.1[\text{deg}]$ となる. この特性により, カラー 3 次元像を色収差なく表示することが可能となる. そのため, 多くの観賞用ホログラムは反射型ホログラムで作成されている.

さて, 本研究では式(3.2)により生じる色分散の効果により, 照明光の角度 θ_{in} を波長 λ から計算する. 従って, 波長選択性は低い方が望ましいため, 本研究では透過型ホログラムを選定した.

3.3 ホログラムの記録

本研究ではホログラムの高速な作成を可能とする HOE プリンタを開発し, HOE プリンタを用いることにより, 目視レベルの不良を検出するのに十分なサイズの HOE を作成している. 3.4 節にて HOE の高速作成技術の詳細に触れる前に, ホログラム材料であるフォトポリマーの特性と, ホログラム作成のメカニズムについて説明する.

フォトポリマーは, 照射される光の強度によって化学反応 (重合反応) が生じ, それにより屈折率が変化する. ホログラム材料は数十 $[\mu\text{m}]$ 以上の厚みを持っており, 光の干渉縞のオーダーの細かさで, 立体的に屈折率を変化させ, それを固定化することができる. 記録後に光を照射すると屈折率の空間分布に合わせて光の位相が変調し, 回折現象を生じさせることができる. つまり, 作成されるホログラムは位相変調の体積ホログラムであり, 高い回折効率を実現

することができる。

フォトポリマーに含まれる化学物質はメーカーにより異なるが、ここではダイソー株式会社の例に基づき説明を行う^[68]。

フォトポリマーは、以下の材料が混合されている。

- ・ 低屈折率バインダーポリマー： ジアリルフタレートプレポリマー
- ・ 高屈折率モノマー： 9,9-ジアリルフルオレン基を有する2官能アクリルモノマー
- ・ 可塑剤： ジエチルセパケート
- ・ 光重合開始剤： 3,3',4,4'-テトラ (t-ブチルパーオキシカルボニル) ベンゾフェノン
- ・ 光増感色素： シアニン、またはメロシアニン

ホログラム作成時の屈折率変調のメカニズムを図 3-7 に示す。これらの材料はホログラム記録前の状態では均一に分布している。そこに干渉光が入射すると、重合反応性の高いモノマーが干渉縞の明部で重合を開始する。この結果、干渉縞の明部と暗部との間にモノマーの濃度勾配が生じ、未反応のモノマーが拡散移動を行う。移動したモノマーが明部で更に重合反応を行う。ここで可塑剤は混合物の粘度を減少させ、モノマーの移動を容易にする働きをする。この結果、明部にはモノマー、暗部にはポリマーの密度が高くなる。干渉光の照射後、コヒーレンスの低い白色光源を照射することにより、残存している色素や光重合開始剤を分離し、未反応モノマーを全て反応させることで、密度差（屈折率差）を定着させる。このようなメカニズムにより、位相変調体積ホログラムを作成することができる。

しかし、可塑剤の効果が強すぎる場合、モノマーの密度分布を維持できず、

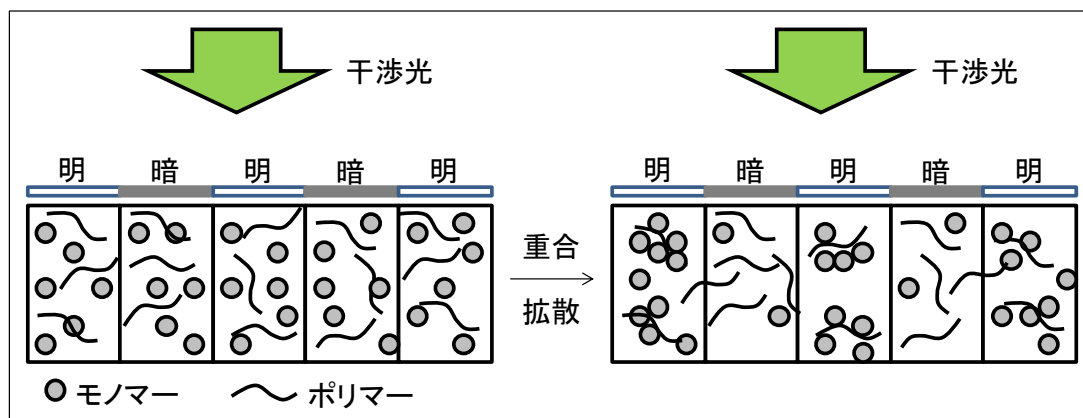


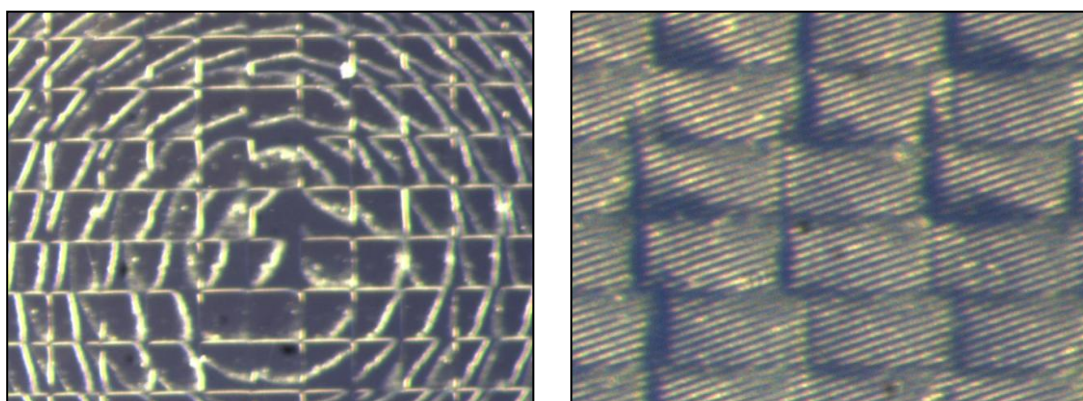
図 3-7 フォトポリマーによる屈折率変調のメカニズム^[68]

ホログラムの作成ができない。また、必要以上の重合反応を抑えるため、反応抑制剤を用いることもある。これらの効果により、弱いレーザーパワーでは全くホログラムを作成できない、という事象が生じる^[69]。これを防ぐ為、干渉縞の露光前に「事前照射」を行い、ある程度の粘度を確保してからホログラム作成用の露光を開始する、という手法が用いられることがある^[70]。

フォトポリマーによる屈折率変化を観察した画像を図 3-8 に示す。これは位相変調の透過型体積ホログラムの例である。ミラーの上に作成したホログラムを置き、上部から白色光源を照射したときの様子を顕微鏡で観察している。場所毎に物体光の方向を変化させることで、回折光の持つ光学レイアウトを変化させることができる。図 3-8(a)は、回折光がレンズのように 1 点に集光する光学レイアウトでの、光軸に相当する部分の顕微鏡像である。光軸近傍では、回折角度が小さく格子間隔 Λ が広いため、顕微鏡にて円状の屈折率変化パターンを観察することができる。図 3-8(b)は入射光を一定方向に回折させるプリズム型の光学レイアウトである。本研究の HOE 照明は図 3-8(b)のタイプを使用した。

3.4 HOE プリンタの構成

さて、ここから HOE を大面積、かつ高速に作成できる HOE プリンタについて説明する。開発した HOE プリンタでは、ホログラム内の微小なスポット(要素ホログラムと呼ぶ)毎に物体光と参照光を角度を変えて照射し、ホログラフィックステレオグラムの原理に基づくホログラムの作成が可能である。



(a) レンズ型のホログラム

(b) プリズム型のホログラム

図 3-8 フォトポリマの構造

干渉パターンという微細な情報を記録するため、一般にホログラフィ技術は振動に弱いという致命的な欠点がある。そのため、光源装置や材料の移動後に制振時間が必要である。そのため、要素ホログラムは1秒間に数点しか作成することができない。本研究では、この方式を「STOP&GO 方式」と呼ぶことにする。「STOP&GO 方式」でのタイミングシーケンスを図 3-9 に示す。一度に複数の要素ホログラムを作成する技術も開発され、数[mm/s]の露光速度が実現されている^[71]が、制振時間が必要であることは変わらない。これに対して、開発した HOE プリンタでは露光中でも光学ヘッドがノンストップに移動する ON THE FLY 方式 (図 3-10) でのホログラムの作成が可能である。そのため、開発した HOE プリンタでは、最大 240 [mm/sec]の速度で、1秒間に 2000 点の要素ホログラムの作成が可能である。

HOE プリンタでは、物体光と参照光を材料の同一面側から照射することにより、透過型の要素ホログラムが作成される。図 3-11 に装置の構成と動作イメージ

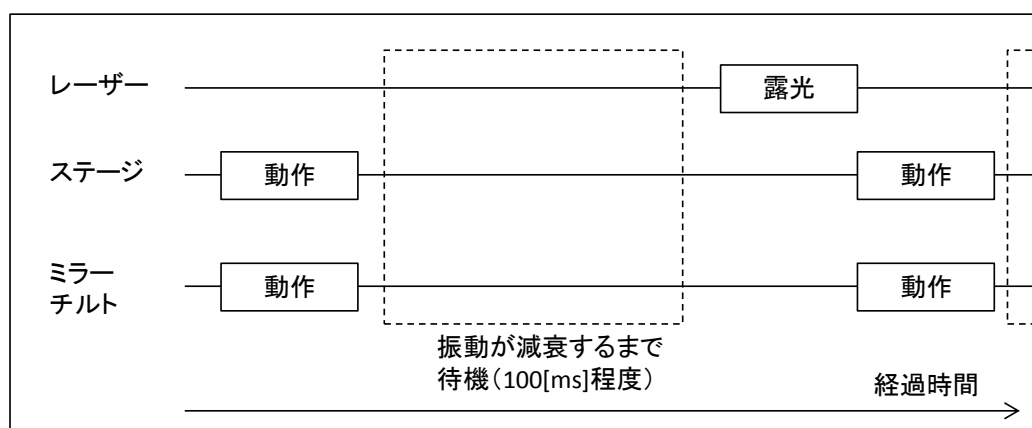


図 3-9 STOP&GO 方式

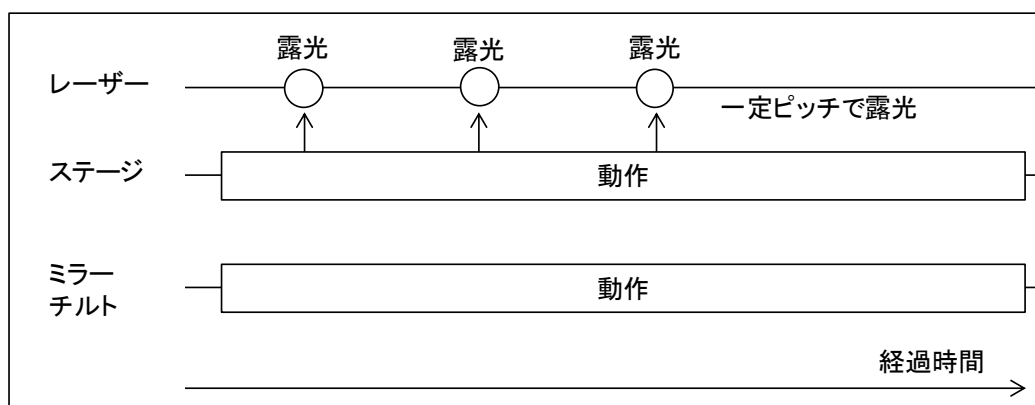
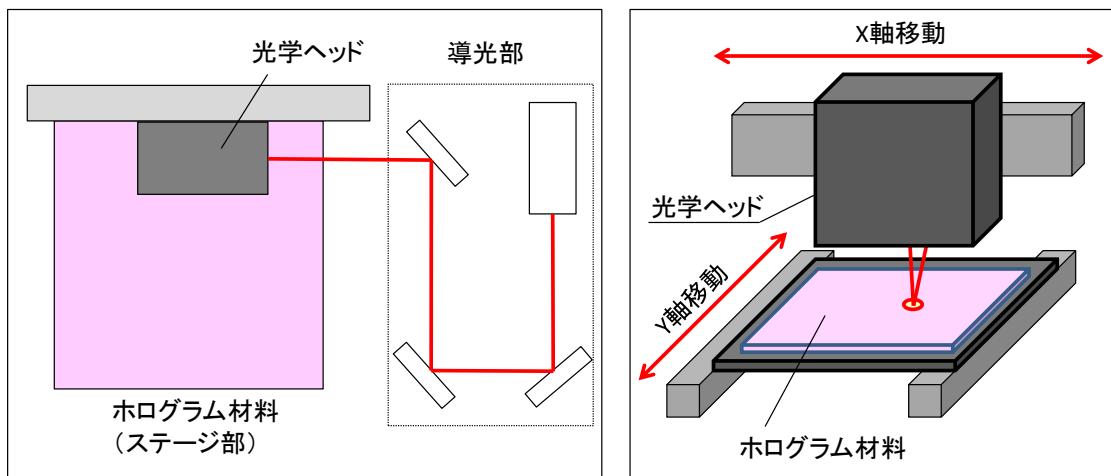
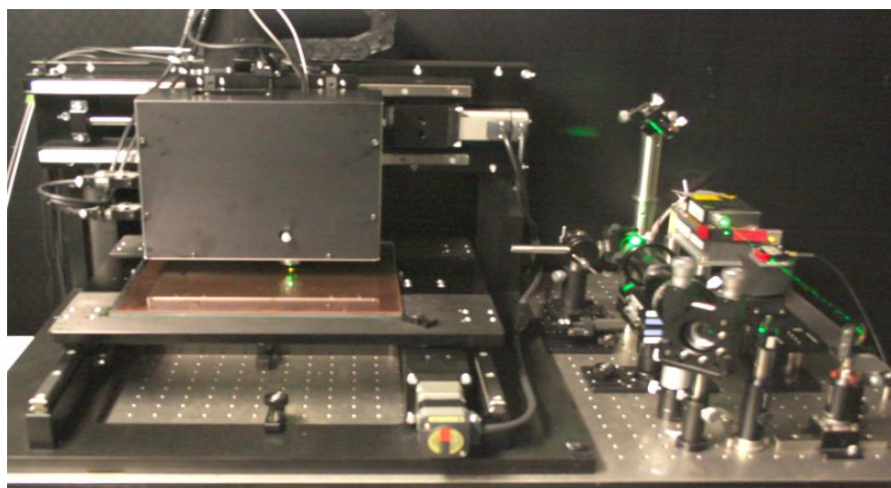


図 3-10 ON THE FLY 方式



(a) HOE プリンタの構成

(b) HOE プリンタの動作



(c) HOE プリンタの外観

図 3-11 HOE プリンタ

ジ、および外観を示す。光学ヘッドから X 軸（左右）方向に高速に移動しながら要素ホログラムの作成を行うことができる。1 列分の要素ホログラム群が作成した後、ホログラム材料を Y 軸方向に一定量移動させた後、再度光学ヘッドを移動させながら次の列の要素ホログラム群を作成する。これを繰り返すことにより、ステージのストローク量である 300[mm]x300[mm]の面積の HOE を作成可能である。

上記の機構であるため、ステージのストロークを長くすることにより、300[mm]以上の大面積 HOE も容易に作成可能である。また、将来的には、Y 軸ステージを改造することにより、ホログラム材料をロール供給し、HOE の量産

製造を可能な構成となっている。

さて、HOE プリンタは、大きく分けてレーザー光源を光学ヘッド部に導光する「導光部」とレーザー光を物体光と参照光に分岐し、HOE 作成用の光として出射する「光学ヘッド部」、光学ヘッド部やホログラム材料を移動し、大面積HOE の作成を可能にする「ステージ部」に分けることができる。

まず、導光部を説明する。導光部の光学レイアウトを図 3-12 に示す。レーザー発振器として Coherent 社の Q スイッチ YAG レーザー VECTOR-532-1000-20 (表 3.2) を使用しており、波長 532 [nm] の単波長にて要素ホログラムの作成を行う。最大 100[kHz](20[kHz] typ.) までのパルス発振が可能であり、1 パルスの幅は 10[ns] である。レーザーの ON/OFF 切り替えはレーザー発振器内部の Q スイッチで実現している。レーザー光自体は 4.5[mrad] の拡がりをもつが、ビームエキスパンダによりレーザー径 $\Phi 10$ [mm] のコリメートされた光を生成する。途中に設置した 1/2 波長板と偏光板により強度調整を行う。その後、立上げミラー 2 枚を用いて、光学ヘッド部の入射口の高さ、及びステージ部の X 軸移動

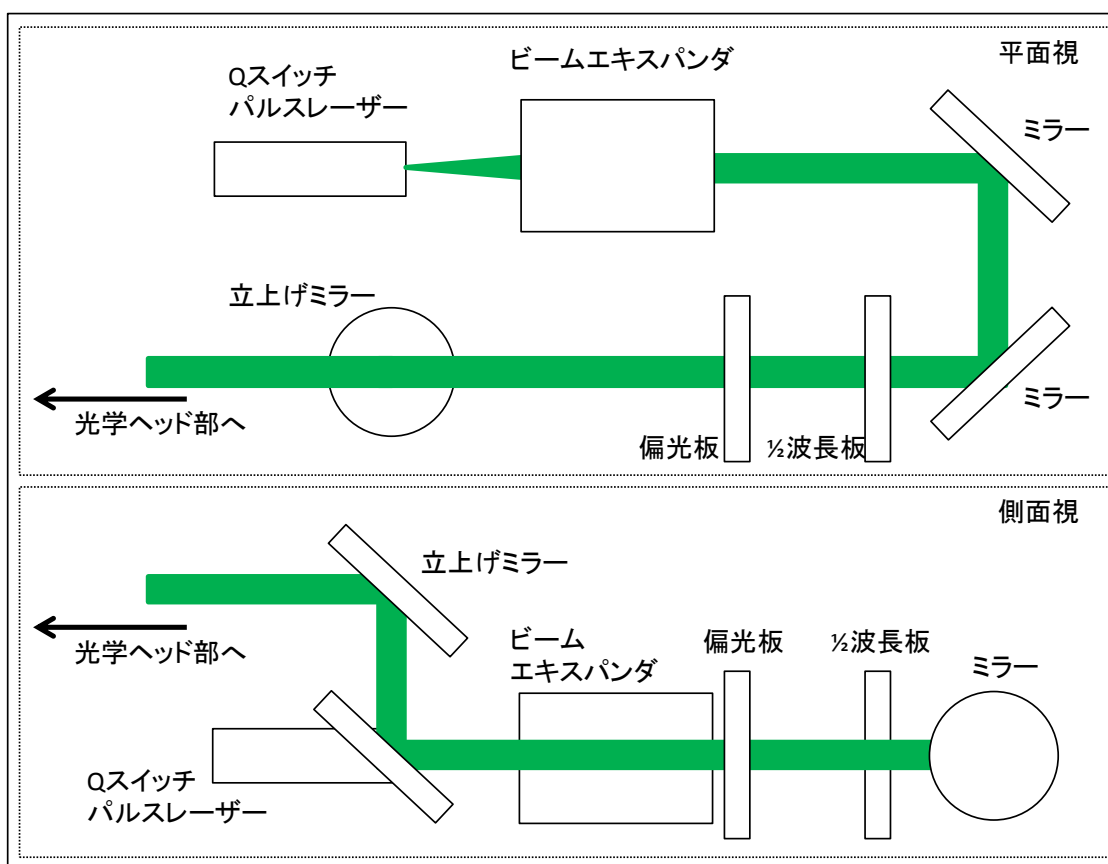


図 3-12 導光部の光学レイアウト

表3.2 レーザー仕様

メーカー	Coherent Japan
型番	Vector-532-1000-20
波長 [nm]	532
発振周期[kHz]	~100
パルス幅[ns]	10@20[kHz]
パワー[W]	1@20[kHz]
拡がり角[mrad]	<4.5
ビーム径[mm]	0.27
レーザーヘッド 外形寸法[mm]	50×32×160
外観	

方向とレーザー光の進行方向を一致させている。光学ヘッドの入り口に配置された 5[mm]角の矩形アパーチャを通ったレーザー光は、対物レンズにより 20 倍に拡大され、0.25[mm] 角の矩形状のレーザーとしてホログラム材料に照射される。

次に光学ヘッド部について説明する。光学ヘッド部の構成を図 3-13 に示す。光学ヘッド内部に入ったレーザーは、上述の矩形アパーチャを通り、レンズにより高耐久ミラー上に集光する。高耐久ミラーで反射されるレーザーは偏光ビームスプリッタ (Polarized Beam Splitter, PBS) を透過した上で、レンズにより平行化された上で、ビームスプリッタ (Splitter, BS) により 2つの光 (物体光と参照光に相当) に分岐する。

物体光側は 2 軸チルトミラーを用いて光の角度が変更可能となっており、ミラーに反射後、参照光とともに BS に戻る。物体光/参照光は元来た経路とほぼ同一の経路をたどり、図 3-13 中の PBS に到達する。ここで、物体光と参照光はともに BS と PBS の間にある 1/4 波長板 (Quarter Wave Plate, QWP) を往復で 2 回通過するため、PBS にて対物レンズ (El-Nikkor x20) 側に反射されることができる。

さて、物体光/参照光はともに対物レンズの後側焦点面で集光されるよう

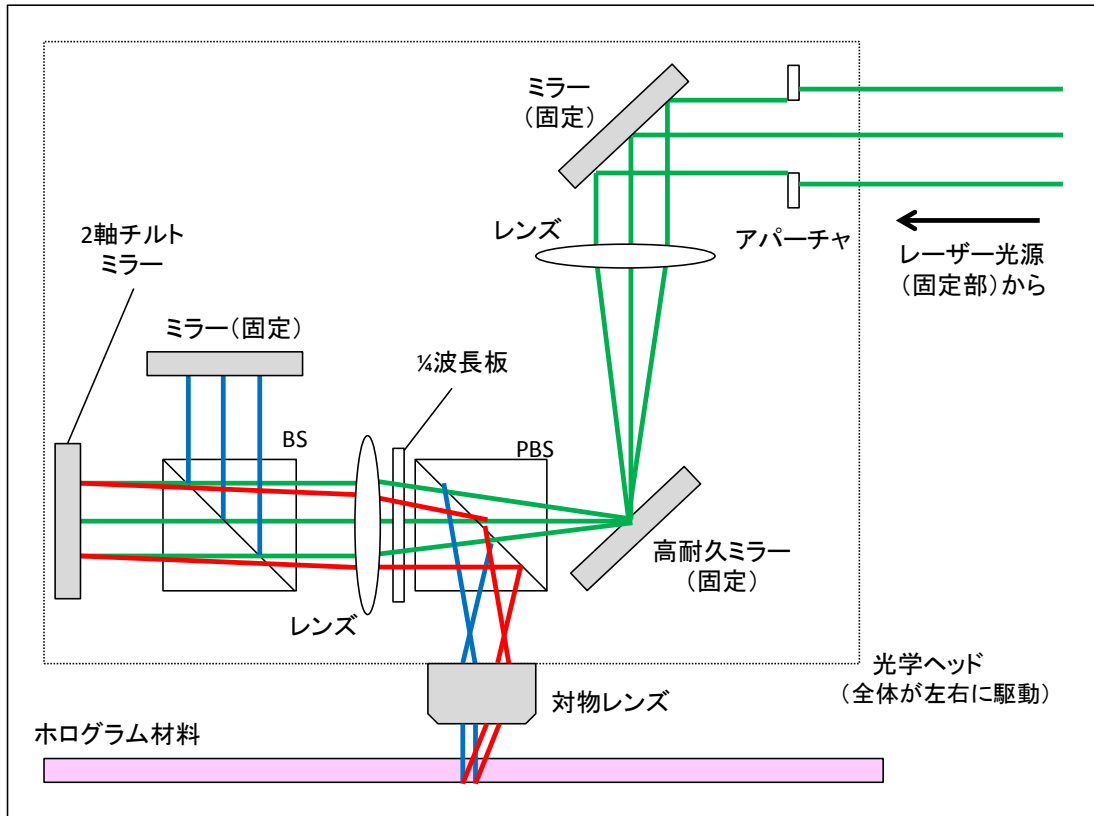


図 3-13 光学ヘッド内部の構成

に、BS と PBS 間のレンズが配置されている。このことにより、対物レンズから出射される物体光／参照光は平行光となる（図 3-14）。物体光と参照光が重なり合う位置にホログラム材料を配置することによりその位置で生じる干渉縞を記録することができる。この光学系で作成するホログラフィ技術をコリニアホログラフィと呼ばれ、ホログラムを用いた記録媒体（Holographic Versatile Disc, HVD 等）の性能向上が進んでいる^{[72]-[76]}。

ホログラムの記録材料としては、Covestro 社(旧 Bayer Material Science 社)の Bayfol HX104 を用いた。フォトポリマーの仕様を表 3.3 に示す。ホログラム材料をガラスに貼り付け、Y 軸移動ステージに設置している。この Y 軸ステージは未露光時に 0.25[mm]ピッチで移動するのみであり、高速で移動するのは光学ヘッド側である。

光学ヘッドは、300[mm]ストロークの X 軸ステージに取り付けられており、光学ヘッドに入射するレーザーの方向を X 軸と一致させているため、光学ヘッドが移動してもレーザー光は入射し続ける。光学ヘッド内で物体光と参照光を分岐する BS と各光を反射させるミラーとの距離はほぼ等距離で、分岐路の距

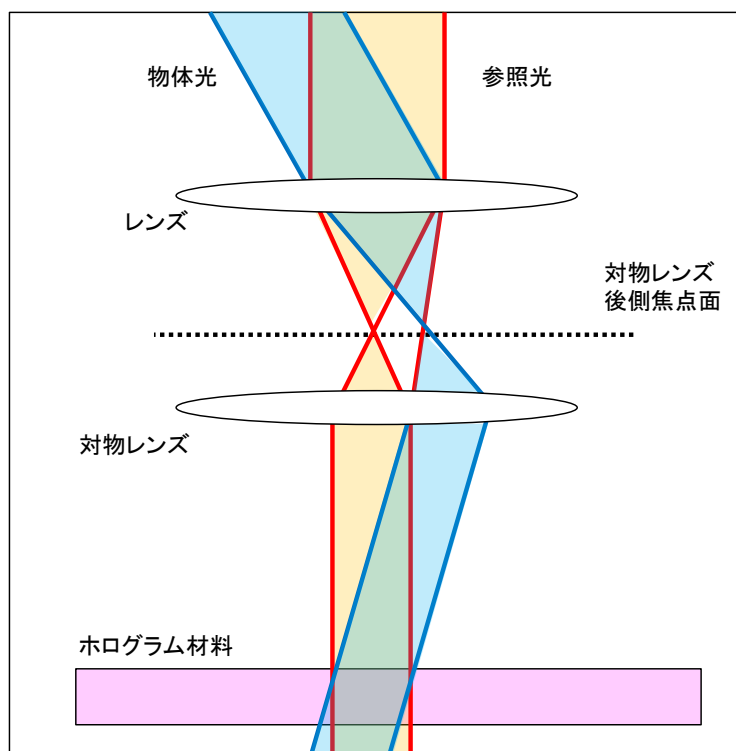
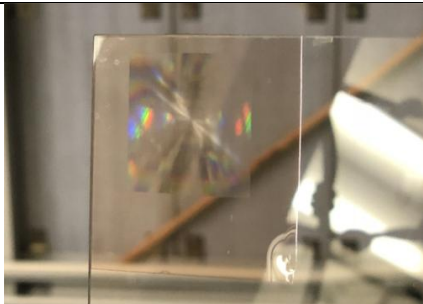


図 3-14 対物レンズにおける物体光と参照光

表3.3 フォトポリマー仕様

メーカー	Covestro
型番	Bayfol HX-104
波長 [nm]	532
屈折率	1.49
フォトポリマー 厚さ[μm]	16
ベース厚さ[μm]	125
外観	

離は 100[mm]以下である。物体光と参照光の光路は、この分岐距離を除いてほぼ同一の経路をとるため、移動中に振動がある場合でも光路長差の変化が生じにくい構成となっている。そのため、露光のたびに静止、及び制振時間分の待機が必要である STOP&GO 方式ではなく、露光中も光学ヘッドがノンストップに移動する ON-THE-FLY 方式でのホログラムの作成が可能である。

次に、光学ヘッドを駆動させながらホログラムの作成を行い、光学ヘッドの速度と回折効率の関係を調査した。物体光は Y 軸周りに+10[deg]、参照光は Y 軸周りに-10[deg]傾けた条件でホログラムを作成している。図 3-15 に示すように、レーザーパルスの頻度[Hz]ごとに最適な移動速度が存在していることがわかる。また、駆動系の制約より移動速度 300[mm/s]までの実験であるが、この範囲では高周波のレーザーパルスの方が回折効率が向上した。本実験では、レーザーパルス頻度 2[kHz]、移動速度 240[mm/s]の条件にて最大回折効率 74[%]を達成した。レーザーの設定を 2[kHz]の連続発振モードにした場合に、ホログラムに入射されるパワーを計測し、物体光／参照光を合わせて 6[mW]であることを確認した。1パルスあたりのパワーは 3[μJ]相当であり、0.25[mm]角の矩形領域に照射していることから、1パルスあたり 4.8[mJ/cm²]のパワーがホログラムに照射されていることになる。2[kHz]、240[mm/s]の条件の場合、パルス間に光学ヘッドが移動する距離は 0.12 [mm]のため、同一領域に 2 回照射を行っていることがわかる。この場合、ホログラム材料には合計 9.6[mJ/cm²]の露光パワーが与えられている計算になる。他のレーザー発振周期の場合でも、回折効率がピークとなる速度でのピッチは 0.08[mm]から 0.12[mm]となっている。これ

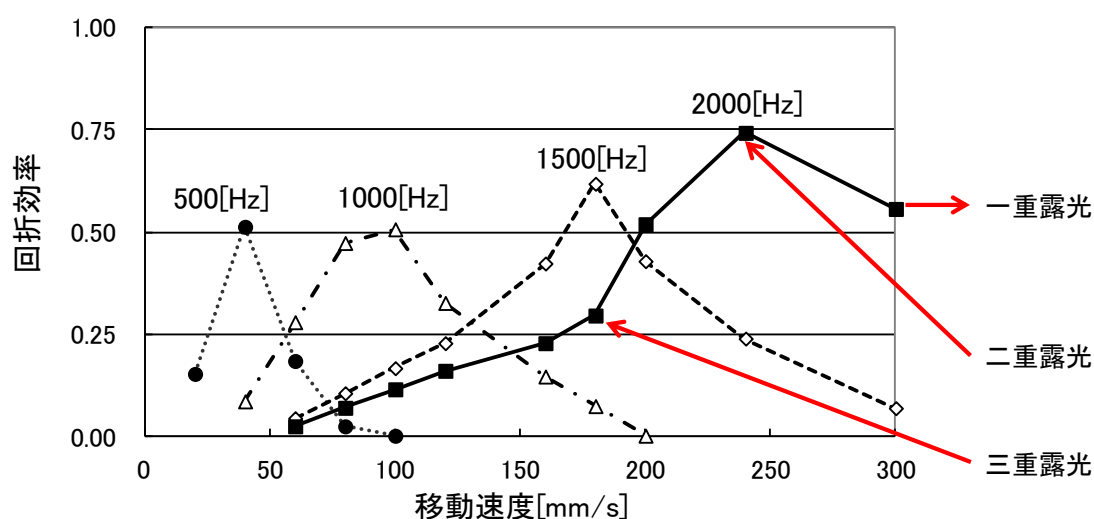


図 3-15 移動速度と回折効率

は、ホログラムの同一領域に2~3重露光を行う条件である。また、2重露光以下となる速度では回折効率が低下し、同一領域に露光が1回しか行われぬ場合には、回折を確認することはできなかった。1重露光でのパワーは4.8[mJ/cm²]であり、8[mJ/cm²]では材料に屈折率変調が生じない、という Weiser らの結果^[69]と一致する。これは、1回目の露光が「事前露光」として機能しており、2回目の露光で干渉パターンが記録されている、と解釈することができる(図 3-16 参照)。一方、Weiser らの実験では20~30[mJ/cm²]が屈折率変調の飽和点であるのに対し、図 3-15 の結果では、10[mJ/cm²]がピークであり、それ以上のパワーでは回折効率が低下している。これは2回目の露光で既に形成された干渉縞による屈折率変調と3回目以降の露光のときの干渉パターンとの間にずれが生じるため、屈折率変調のピッチ、及び変調の振幅が小さくなるためと考えられる。

本節の最後に、開発した HOE プリンタの作成速度の比較を表 3.4 に示す。なお、表 3.4 中では、要素ホログラムを Hogel という名称で記載した。パイオニアの伊藤ら^[77]は、3D の胎児エコー画像をホログラムで表示する「ぷりホロ」というサービスで用いられたホログラムプリンタを開発した。商業用途で使用するため、振動対策をはじめとした対策を施しているが、80[ms]の制振時間が必要であり、ホログラム作成速度は1[mm²/s]以下である。また、Samsung の Morozov ら^[71]は、同時に複数の要素ホログラムを作成するシステムを開発したが、伊藤らと同様に制振時間が必要であるため、ホログラム作成速度は5[mm²/s]

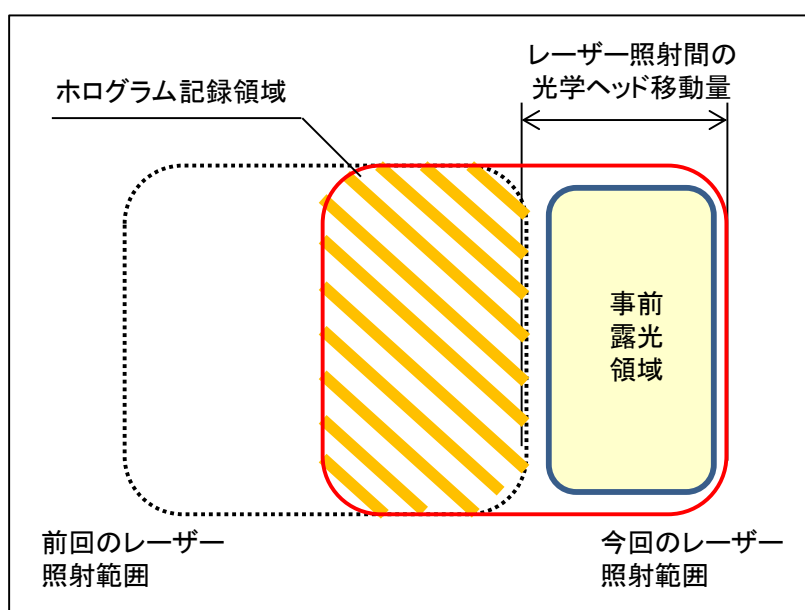


図 3-16 二重露光によるホログラムの作成

表3.4 ホログラム作成速度の比較

	方式	Hogel サイズ [mm]	Hogel作成 パルス [puls/s]	Hogel作成 速度 [mm/s]	HOE作成 速度 [mm ² /s]	HOE サイズ [mm]
パイオニア ^[77]	STOP&GO	0.3 ×0.3	8	2.4	0.7	75 ×50
Samsung ^[71]	STOP&GO	0.2 ×0.2	125	5.0	5.0	100 ×100
Optware ^[78]	ON THE FLY	0.5 ×0.5	40	20.0	10.0	150 ×150
本研究	ON THE FLY	0.25 ×0.25	2,000	240.0	60.0	300 ×300

に留まる．一方，Optware の Horimai らは，本 HOE プリンタでも採用したコリニア方式を用いて ON THE FLY でのホログラム作成を可能にしている^[78]．しかし，Horimai らが作成したプリンタは反射型ホログラムであり，光学系が複雑になる等の原因により，光学ヘッドの移動速度は 20[mm/s]に留まっている．一方，本研究での開発した HOE プリンタは，透過型 HOE の作成に特化して最小限の光学構成を構築しており，240[mm/s]という，他の研究に比べ 10 倍以上高速な条件での HOE 作成を実現した．

3.5 HOE の特性

本節では，第 4 章，及び第 5 章の実験で用いる HOE の有する特性について述べる．用いた HOE は，参照光はホログラム面に対して垂直であり，物体光はホログラム面に対して 13.5[deg]の角度をつけた条件で作成したものである．図 3-17 に使用した実験装置の構成を示す．回転ステージ上に HOE を設置する．

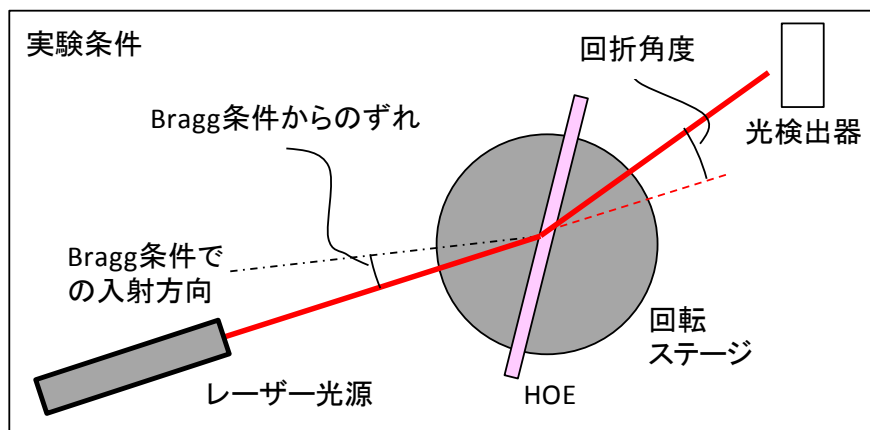


図 3-17 ホログラムの評価実験の構成

レーザー光が回転ステージ中心を通る位置にレーザー光源を設置し，HOE に対して反対側に 1 軸の移動が可能な光強度センサを設置した。

まず，回折角度の分布について調査した。回転ステージを入射光側の Bragg 角を基準に一定角度回転させ，回折光を測定した結果を図 3-18 に示す。横軸は回転ステージの回転量であり，縦軸の数値は，各回転角度において，光強度センサを移動させてその最大値となった量を Bragg 回折角度での光強度に対する比である。なお，レーザー光の波長は 532[nm]であり，作成時と同じ波長を用いた。また，グラフには式(3.23)を用いてフィッティングした結果を図 3-19 に示す。今回作成した HOE の Bragg 角 θ_B は 13.5[deg] であり，回折効率が半

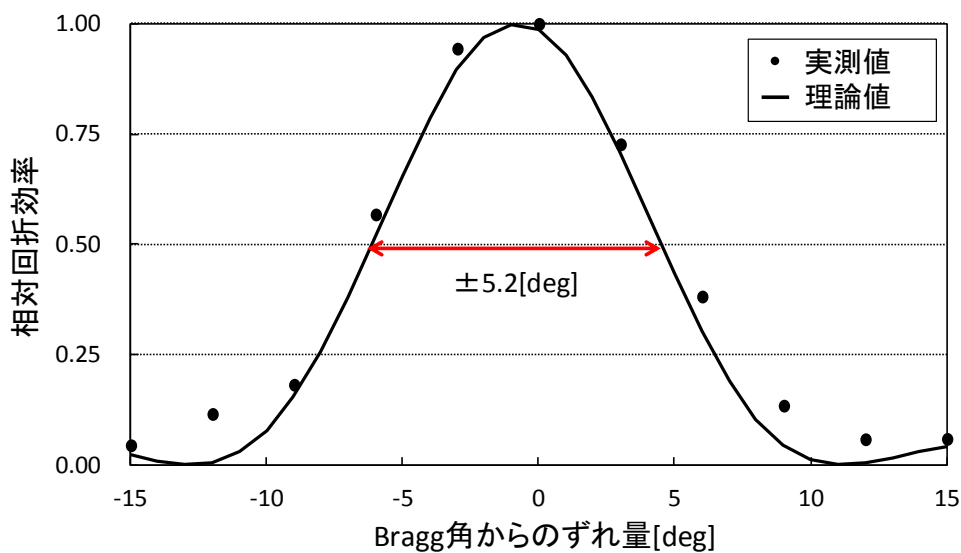


図 3-18 入射角度に対する角度選択性

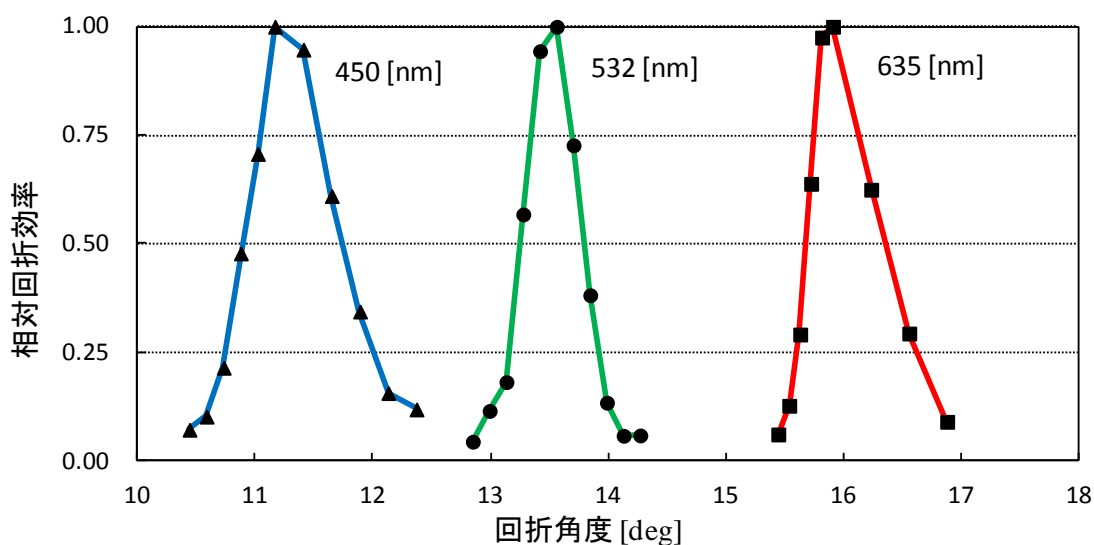


図 3-19 回折角度

分になる角度ずれ量は 5.2[deg]となった。これは、式(3.24)の直後に行った推定(5.5[deg])とよく一致している。

次に、HOE の回折角度を波長別に確認した (図 3-19) 。実験結果から、青(450[nm])の光は 11.2 ± 0.4 [deg]、緑(532[nm])の光は 13.5 ± 0.3 [deg]、赤(635[nm])の光は 15.9 ± 0.4 [deg]の回折角を有していることが確認された。これらの角度は、式(3.2)において $\Lambda = 2.28$ [μm]として計算される回折角度に対して誤差 2[%]の範囲内で一致している。

これら実験結果から、HOE プリンタにより作成された HOE は理論値に近い適切な特性を有していることが確認できた。

3.6 まとめ

本章では、提案法で使用する照明の重要構成要素である HOE について説明を行った。まず、回折の基本原理について説明し、色分散の指標である Abbe 数について、回折型素子での数値を導出した。さらに、屈折型素子との比較を行い、回折型素子の色分散は 10 倍程度と非常に大きく、屈折型とは逆方向の色分散であることを確認した。大きな色分散は、回折光の角度が微小に変化したとき、その波長が大きくことなることを示している。これは、光沢表面上の不良による微小な角度変化を色により検出する、という提案法にとって、回折光学素子が非常に好ましい特性を有することを意味する。

次に、ホログラムの原理と種類、また、回折効率や角度及び波長選択性等の重要な指標について述べた。また、フォトポリマーを原材料としたホログラムの作成メカニズムも説明している。提案法での HOE の用途はマシンビジョン用の照明であり、高い照度を有する方が望ましい。本研究では、この目的に適したホログラムのタイプとして、高い回折効率を実現可能な、フォトポリマーによる位相変調体積ホログラムを選定している。

体積ホログラムの持つ高い角度選択性は、特定の角度の入射光のみを回折させ、範囲外の入射光は回折に寄与しないことを意味する。つまり、指向性が高くない LED を光源とした場合でも、回折光自体の指向性は高くなる。一方、本研究で求められる照明は、広い波長帯域において光を回折させることが望ましい。その目的のため、本研究では波長選択性の高い反射型ではなく、波長選択性の低い透過型ホログラムを用いている。

さらに、本研究にて開発した HOE プリンタについて述べた。本プリンタは、本研究で用いる、フォトリソを用いた位相変調透過型体積ホログラムを大面積かつ高速に作成することが可能である。ホログラフィは光の干渉縞を記録するため、作成時の振動は HOE の品質に重大な影響を及ぼすことが懸念される。開発した HOE プリンタは、コリニア方式と Q スイッチパルスレーザーを用い、光学系を最適化することにより、振動がある条件化でも HOE の作成が可能である。この結果、光学ヘッド移動速度 240[mm/s]で回折効率 74[%]の HOE が作成可能であること確認した。他の研究と比較し、この HOE 作成速度は従来の HOE プリンタに比べ 10 倍以上高速であることを確認した。

本章で述べた HOE 作成技術は、用途に合わせてカスタマイズされたホログラムの量産に繋がる技術であると考えられる。現時点では限られた環境で限られた研究者により少数作成される専門性の高いホログラムを、広く一般に認知され、現在より幅の広い分野に応用されていくことを期待したい。

第4章 光沢表面の法線方向の角度測定

本章では、第3章で述べたホログラフィック光学素子(Holographic Optical Element, HOE)の組み込まれた照明(HOE照明)を使用することで光沢表面の法線方向を測定可能なシステムを構築できることを示す。まず、4.1節では測定原理と具体的な測定手法について述べる。4.2節では、実際に構築したシステムについて説明し、校正方法を示す。4.3節では平面ミラーを用いた測定実験について述べ、4.4節では曲面ミラーによる実験結果を示す。また、4.5節では照明光源と照明光、測定される色相との関係について述べる。4.6節では本章の考察を行う。

4.1 測定原理

本節では入射光/反射光と表面法線方向との関係を述べ、法線角度の計算式を導入する。表面で反射される光には、2.3節で述べたように拡散反射成分と鏡面反射成分が存在しており、光沢表面では鏡面反射成分が支配的である。鏡面反射は、入射光の方向(\mathbf{k}_{in})と表面の法線方向(\mathbf{n})に応じて特定方向(\mathbf{k}_R)に強い反射光が生じる。それらの関係は以下の式で表現することができる。

$$\mathbf{k}_R = \mathbf{k}_{in} - 2(\mathbf{k}_{in} \cdot \mathbf{n})\mathbf{n} \quad (4.1)$$

図4-1に二次元的に表現した鏡面反射の様子を示す。光源からの照射光を光沢表面上での反射を通して観測する場合、光源からの光の方向(入射光線方向)を θ_{in} 、反射光線方向(カメラでの視線方向)の角度を θ_R 、反射位置での表面の法線方向を θ_n とすると式(1)の関係が成立する光線が観測される。

$$\theta_n = (\theta_{in} - \theta_R) / 2 \quad (4.2)$$

カメラの各画素(u, v)における視線方向に対応する角度は事前の校正により取得することができる。その画素位置での入射光線角度 $\theta_{in}(u, v)$ を知ることがで

できれば、式(4.2)により表面法線方向を計算することが可能である。3.4節で述べた特徴を有する HOE を用いることにより、角度に応じて波長が変化する照明を製作でき、提案法を実現する光学システムを構築可能となる(図 4-2)。

さて、カラーカメラでの観察像から、一般に各画素 (u, v) ごとの R, G, B 値から式(4.3)により定義される色相 φ_H を算出することができる。

$$\varphi_H(u, v) = \tan^{-1} \left(\frac{\sqrt{3}(G(u, v) - B(u, v))}{2R(u, v) - G(u, v) - B(u, v)} \right) * 180 / \pi \quad (4.3)$$

式(4.3)により、色を $0 \sim 360[\text{deg}]$ の範囲で表現することができる。なお、赤

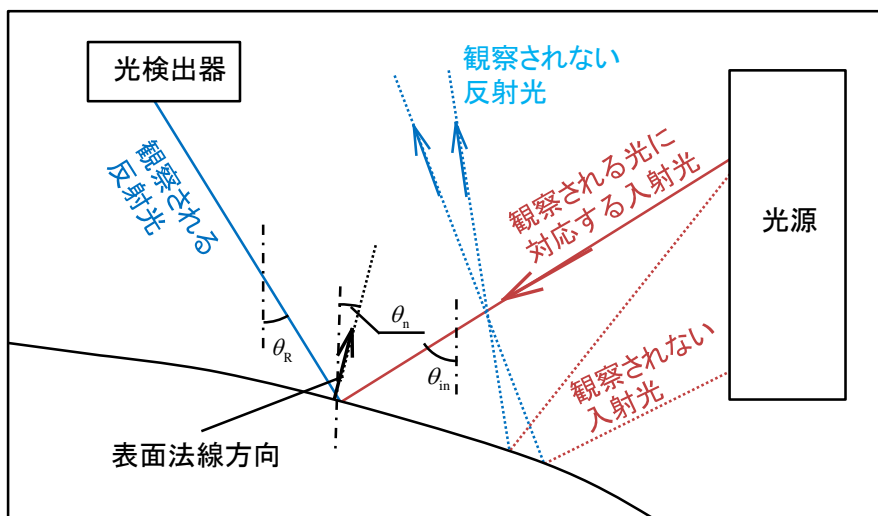


図 4-1 光沢表面での鏡面反射

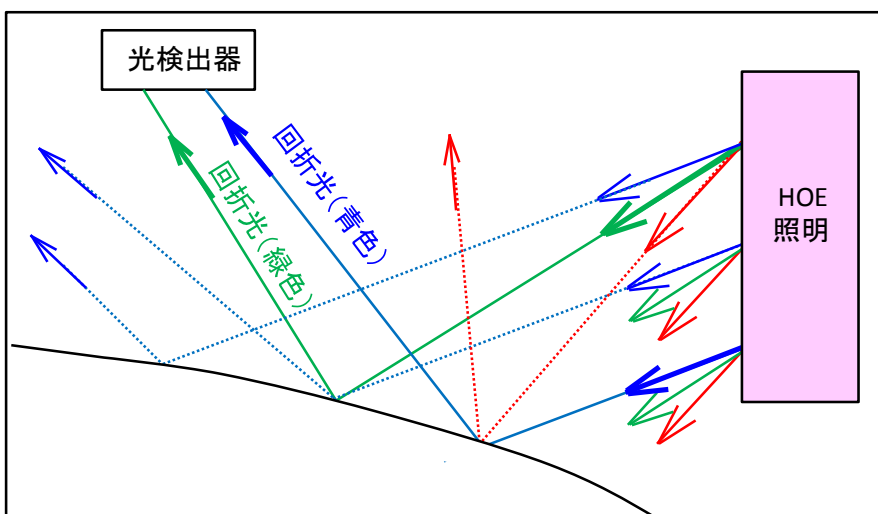


図 4-2 HOE 照明

($G=0, B=0$) は $0[\text{deg}]$, 緑 ($R=0, B=0$) は $120[\text{deg}]$, 青 ($R=0, G=0$) は $240[\text{deg}]$ に対応している. この式で明らかな通り, 色相は各画素での R, G, B 輝度の比で表現されるため, サチュレーションのない限り露光時間の影響はない. この特性は受光量が増減しやすい光沢表面の測定に適している. 波長の変化により色相も変化するため, HOE 照明を用いた本システムでは, 光線角度も色相の関数とみなすことができる. 撮影範囲全体に一律な特性を有していると仮定できる場合, 光線角度と色相の関係は画素位置に依らない関係式

$$\theta_{\text{in}} = f(\varphi_{\text{H}}) \quad (4.4)$$

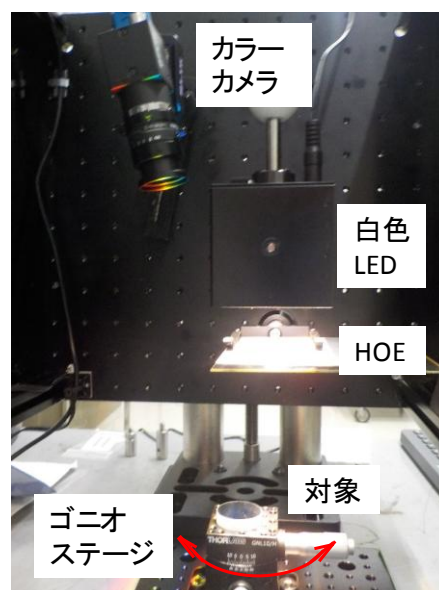
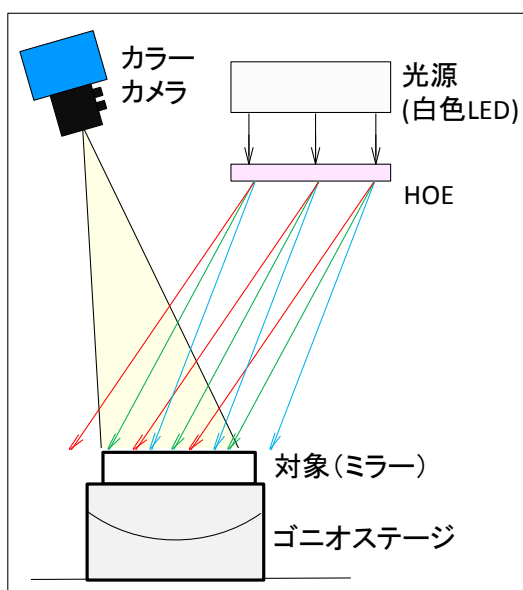
となる. 関数 f を事前取得することで, 式(4.2)により表面の法線方向を得ることができる.

4.2 構築システム

本節では, 表面法線角度の測定実験について述べる. 4.2.1 項では使用した機器の構成/スペックについて述べる. 4.2.2 項では, カメラの各画素における視線方向 $\theta_{\text{r}}(u, v)$, 入射光の光線方向 θ_{in} と色相 φ_{H} との関係を得るための実験手法, 及び基準とする入射光の光線方向の決定方法について説明する.

4.2.1 実験機器の構成

提案法では, 図 4-3 に示すように白色 LED 光源の前面に HOE を設置し, 対象に照射される光をカラーカメラにより観察することで光沢表面の法線方向の変化を検出する. 本節では, 実験機器のスペックについて記載する. 光源には, 白色 LED が内蔵されたパイフオトニクス社のホロライト (表 4.1) を使用した. 内蔵されたレンズにより照射領域 $60[\text{mm}]$ 角で拡がり角 $1.2[\text{deg}]$ の光を照射できる. 分光器 (浜松ホトニクス社製 TM-UV/VIS, 表 4.2) を用いて測定した光源の波長分布を図 4-4 に示す. 青と緑の間の領域 ($480[\text{nm}]$ 付近) に照度が弱くなる部分があるものの, $420\sim 690[\text{nm}]$ の範囲でピークの 4 割以上の照度を有する領域が連続的に存在することを確認できる. また, カラーカメラには FLIR 社の Blackfly S Color 5.0 MP(表 4.3)を使用した. 単板式であり, センサとして Sony の IMX250 を搭載する. IMX250 の受光感度特性を図 4-5 に示す^[79].



(a) 光学系

(b) 撮影の様子

図 4-3 撮影光学系

表4.1 光源仕様


メーカー	パイフotonクス
型番	ホロライトミニ
色	白色
サイズ[mm]	60x60
外観	

表4.2 分光器仕様

メーカー	浜松ホトニクス
型番	TM-UV/VIS
対応波長 [nm]	200-800
波長分解能[nm]	6
寸法[mm]	95x92x76
外観	

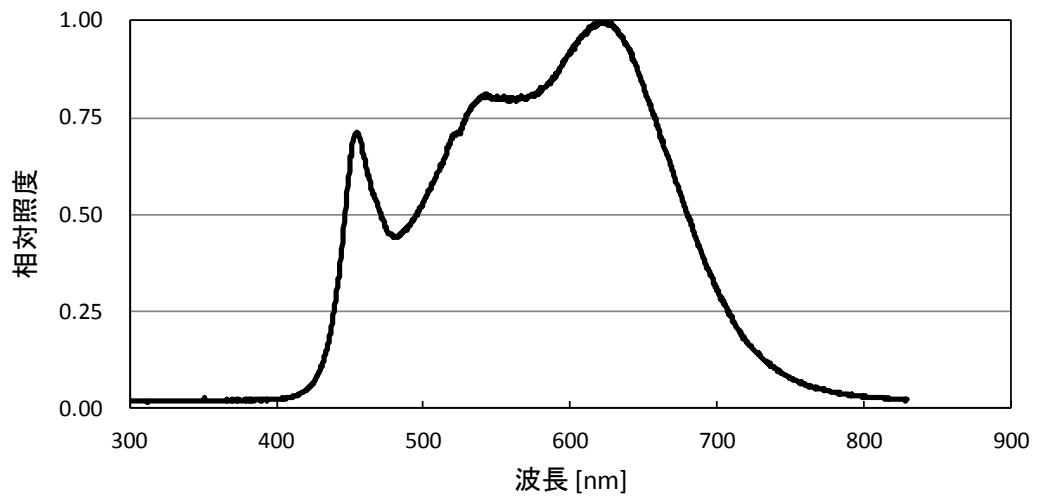


図 4-4 光源の波長分布

表4.3 カメラ仕様

メーカー	FLIR
型番	Blakfly S Color 5.0 MP
画像タイプ	RGBカラー
寸法[mm]	60x60
サイズ[pixel]	2448 x 2048
フォーマット	2/3インチ
外観	

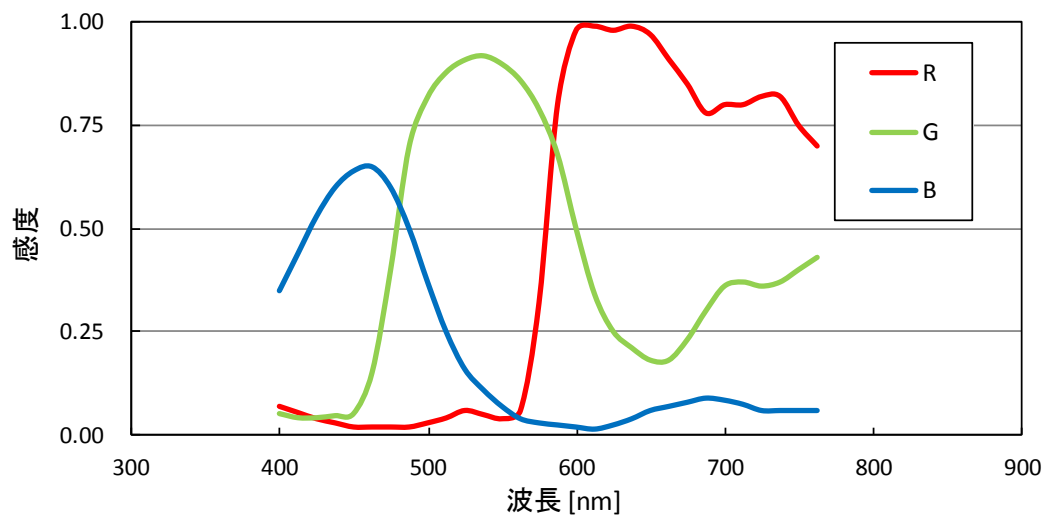


図 4-5 カラーカメラの分光特性

次に、使用した HOE について述べる。3.5 節で評価したものと同様のスペックであり、光源をレーザーとしたときの回折角度は図 4-6 (図 3-19 再掲) のように分布する。ここで、横軸は HOE に垂直にレーザーを照射したときの 1 次回折の角度分布であり、縦軸はレーザーのピークパワーに対する相対的な回折効率である。ホログラムは緑色(532[nm])のレーザーで作成しており、緑(532[nm])の光は 13.5 ± 0.3 [deg], 青(450[nm])の光は 11.2 ± 0.4 [deg], 赤(635[nm])の光は 15.9 ± 0.4 [deg]であることを確認している。ここで、プラスマイナスは回折光のパワーが半分になる位置を示している。

続いて、図 4-7(a)に HOE 照明システムによる高次回折を含めた回折光の様子を図示している。太矢印は各次数での緑波長での回折方向を示している。各次数の回折光はそれぞれ波長による色分散が生じており、太矢印中に赤、緑、青の光の回折方向を示す矢印も記載している。図 4-7(b)は実際の回折光の様子である。回折の様子をわかりやすくするため、図 4-7(b)では光の照射領域に紙(散乱物体)を設置しており、また、光線方向を追記している。HOE を透過した後の光は、式(3.2)中の $m=1$ のときである 1 次回折光のほかに、回折をしない光($m=0$ の回折光)、 $m=2$ 次回折光、 $m=-1$ 次回折光も同時に生じる。HOE に近い領域(図 4-7 の赤点線内)では様々な回折光が混在しており、その領域に測定する光沢物体を設置することにより、色による表面の法線角度の測定が可能となる。本章の実験は全て、1 次回折光の鏡面反射光のみを観察できる位置にカメラを設置した条件で実施している。

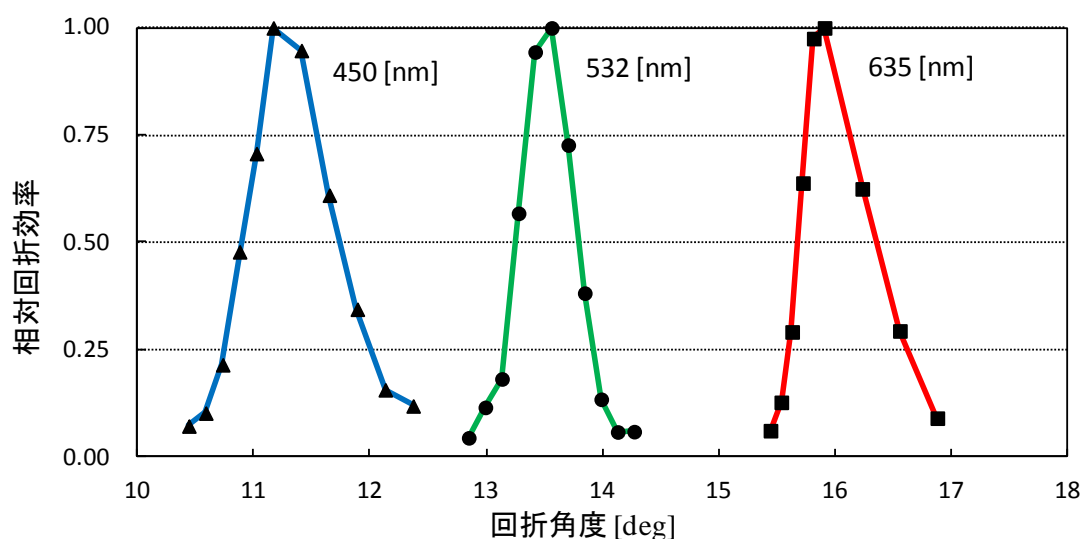


図 4-6 回折角度 (図 3-19 再掲)

4.2.2 計算に必要なパラメータの測定

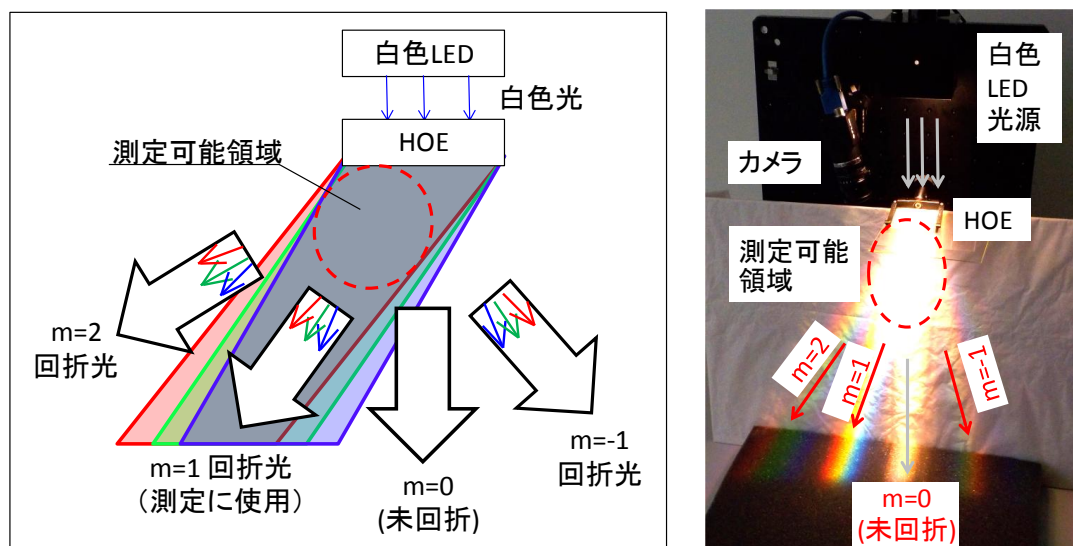
本項では、測定に必要なカメラの各画素における視線方向 $\theta_R(u, v)$ 、入射光の光線方向 θ_{in} と色相 ϕ_H との関係を得るための実験手法、及び基準とする入射光の光線方向の決定方法について説明する。

まず、カメラの各画素における視線方向の取得方法について述べる。ここでは、簡単のため、HOEの色分散の方向とカメラ座標の u 方向は方向が一致するものとする。レンズの内部パラメータの算出や歪み補正等を行わず、直接的に各画素に対応する視線方向を取得した。使用した光学系を図4-8に示す。

まず、HOEにより回折する方向とチェスボードの x 軸方向が一致するように、床面に水平に設置を行う。従って、カメラの x 方向の視線角度を測定で使用する視線角度 θ_R とみなすことができる。そのように設置されたチェスボードに対し、通常の白色照明下で交点の画像中の位置を求める。チェスパターンの撮影範囲内の任意画素(図4-8中の u や u')に対して、周辺の交点位置からの補間によりチェスボード平面中の座標(図4-8中の $x_1(u)$ 、 $x_2(u)$)を求めることができる。次に、 z ステージを用いて高さを変化させ、同様のものに座標を計算することにより、各画素の視線角度 $\theta_R(u)$ を算出可能である。

$$\theta_R(u) = \tan^{-1}((x_1(u) - x_2(u)) / Z) \quad (4.5)$$

次に、図4-3に示しているように、手動ゴニオステージ上に面精度 $\lambda/10$ の



(a) 回折光と測定可能領域の関係

(b) 回折の様子

図4-7 回折光の模式図

平面ミラーを設置し，ゴニオ回転角度を変えて撮影をおこなった．手動ゴニオステージは仕様上の精度は $0.167[\text{deg}]$ であるが精密マイクロメータを用いることにより，別途実験にて手動位置決めにより標準偏差 $0.016[\text{deg}]$ での調整が可能であることを確認している．ゴニオステージ回転量 $-1.0[\text{deg}]$, $0.0[\text{deg}]$, $1.0[\text{deg}]$ でのカラーカメラによる平面ミラーの撮影例を図 4-9 に示す．カメラのレンズには通常の CCTV レンズを用いたため，画素位置により視線方向が異なる．そのため，視線方向に対応した入射側の光線方向変化が発生し，画素位置の変化に応じた色相変化が生じている．また，撮影画像の輝度にムラが存在している．これは光源による照度ムラであるが，以下に使用する色相は， R, G, B 値の比で計算される．そのため，照度ムラは色相には影響を与えない．

ゴニオ回転量 $0.0[\text{deg}]$ のときのミラー中心の画素位置において， $0.2[\text{deg}]$ ずつミラーを回転させたときの R, G, B 変化及び色相変化を図 4-10 に示す．ここで，横軸の光線角度は以下の手順で定義した．まず，ゴニオ回転量 $0.0[\text{deg}]$ の撮影画像からミラー中心の画素位置を求め，対応する視線方向を計算する．この位置において式(4.2)の左辺が $0.0[\text{deg}]$ となるよう光線角度の値を定義した．その後，ゴニオステージの回転量から式(4.2)により光線角度を計算し，図 4-10 の横軸としている．図 4-9 より色相が光線角度に応じて単調変化することがわかる．

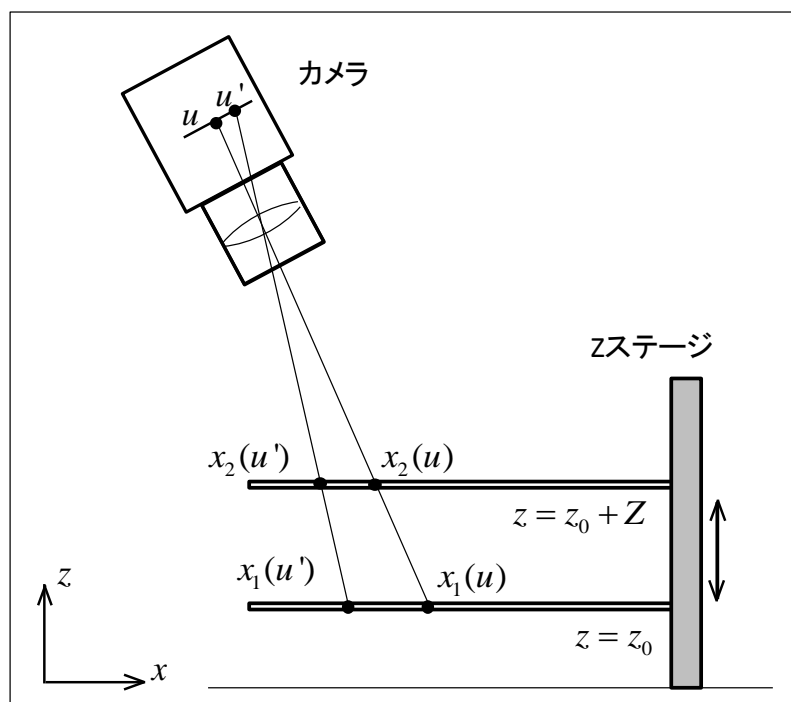


図 4-8 視線方向の校正方法

さて、入射光の光線方向と色相との関係式(4.4)の f が線形であると仮定して以下の近似式を導入する。

$$\theta_{in} = A\varphi_H + B \quad (4.6)$$

ここで、 φ_H は式(4.3)に示す色相であり、 A および B は線形近似のための係数である。色相が 30[deg] から 210[deg] の範囲でフィッティングを行った結果、今回構築したシステムでは、 $A = -0.02037$ 、 $B = 16.00$ という結果が得られた。図 4-10 から、30[deg] から 210[deg] の範囲では色相と光線角度の関係は高い線形性を有することが確認できる。

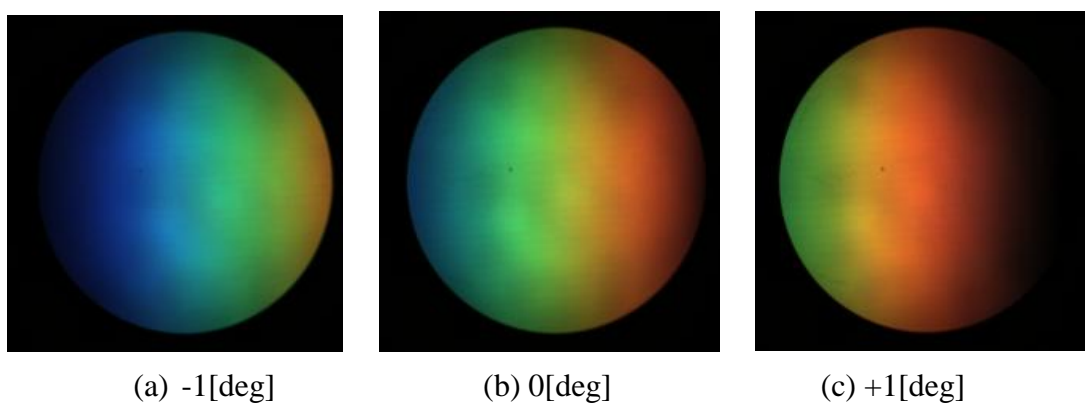


図 4-9 ゴニオステージ回転による撮影画像の変化

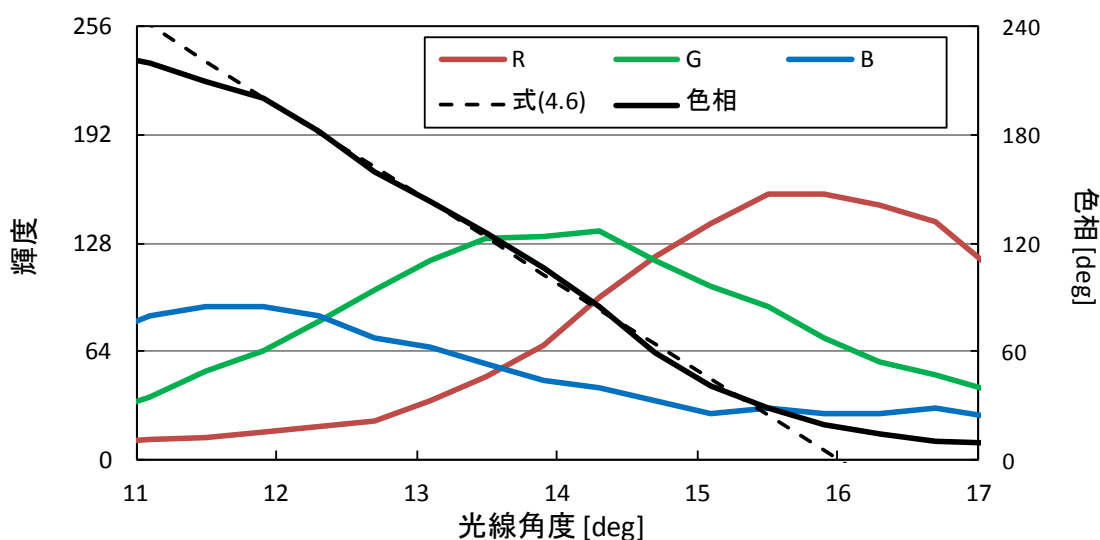


図 4-10 ミラー回転時の R, G, B 値と色相の変化

4.3 平面ミラーに対する表面法線角度の測定

本節では、平面ミラーを対象とした、表面の法線角度の測定実験について述べる。まず、平面ミラーを手動ゴニオステージ上に設置し、 $-2.0[\text{deg}]$ から $+2.0[\text{deg}]$ の範囲で $0.2[\text{deg}]$ ずつ回転させ、ミラー中心を通る横方向の画像断面に対して法線方向を計算した。法線方向の角度は、各画素の色相から式(4.6)により求められる入射光線角度と画素ごとの視線方向データを式(4.2)に代入することで求める。ここで、輝度が低い領域は色相の誤差が大きいため計算から除外した。また、式(4.6)の近似式の範囲外（色相が $30[\text{deg}]$ 以下、及び $210[\text{deg}]$ 以上）の場合も、図4-10で確認できるように近似式からの誤差が大きいため計算から除外した。

ミラー角度を変えて、画像中の平面ミラー中心を通る横断面に対して法線方向の角度を測定した。ミラー角度が $-1.0[\text{deg}]$, $-0.4[\text{deg}]$, $0.0[\text{deg}]$, $0.4[\text{deg}]$, $1.0[\text{deg}]$ のときのミラー中心を含む画像断面での法線方向の角度変化を図4-11に示す。平面ミラーの面精度は $\lambda/10$ であり、今回の測定実験では無視できるオーダーであるため、法線角度は一定とみなし評価を行った。全てのミラー位置において、グラフの右側にいくに従って色相は減少しており、色相 φ_H が $70[\text{deg}]$ 以下の赤色領域での測定角度は、測定範囲全体の角度平均に比べて小さい値となっており、最大のズレ量もこの領域内で生じている。これは近似式(4.6)と実際の光線角度との差（図4-10参照）が原因である。なお、測定された角度

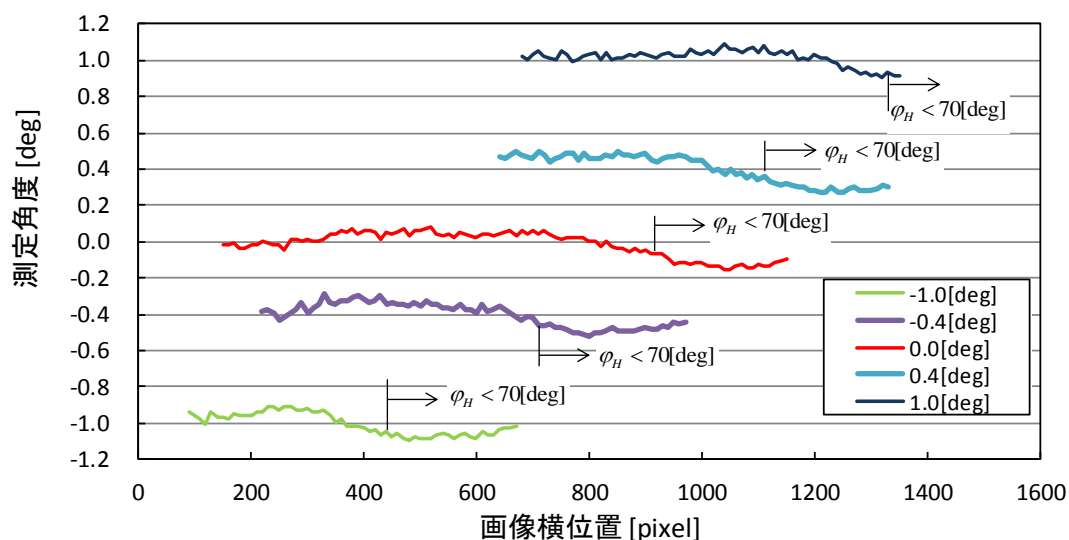


図4-11 異なるミラー角度での法線角度の断面プロファイル

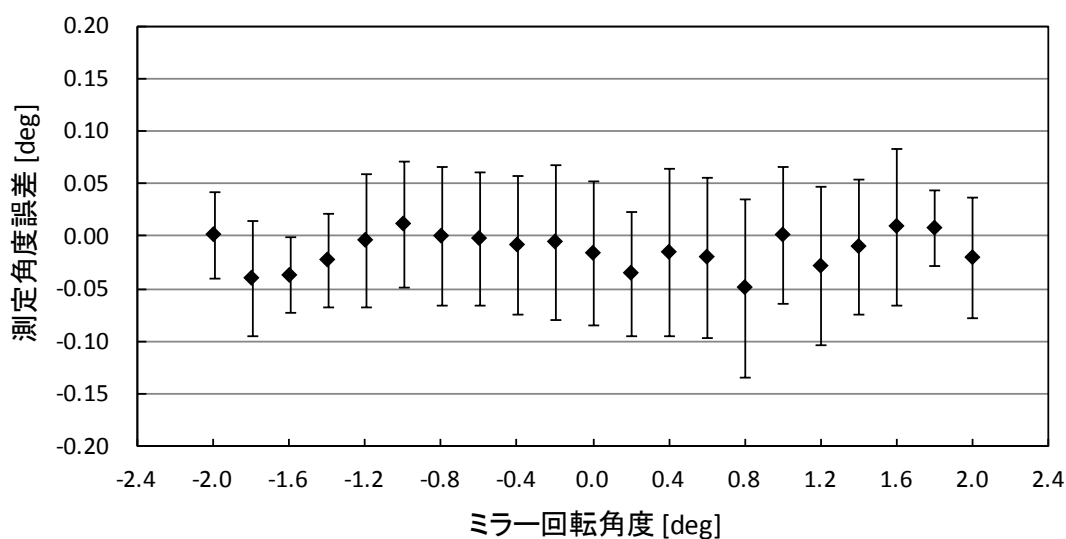


図 4-12 ミラー回転時の繰り返し精度

分布と 1 画素あたりの寸法から推定される高さ変化量は最大 8[μm]であった。

また、対象を平行移動させ、10 回測定したときの繰り返し精度を確認した。手動操作によりゴニオステージで設定した回転量と角度平均との差、および断面全体での角度の標準偏差を図 4-12 に示す。また、角度平均の標準偏差は 0.010[deg]であり、画素を固定したときの測定角度の標準偏差は平均 0.029[deg]であることを確認した。一方、断面全体での角度の標準偏差は 0.085[deg]であり、上述のとおり近似式の精度が起因すると考えられる。

4.4 曲面ミラーに対する表面法線角度の測定

前節では平面ミラーを傾け、光沢を有する平面の法線角度の測定を行った。この実験では、反射光は平面波とみなせる一方、対象が凸や凹形状の場合、反射光は球面波であり、光の収束や発散が生じる。特に凹面の場合は光の収束が生じるため、撮像素子の特定部分には、複数の角度を有する光が混合した状態の光が照射されるため、提案法による法線角度の測定可能性は必ずしも自明であるとは言えない。

そこで、本節では、凹面ミラーを対象とし、表面の法線角度の測定実験を行った。使用したミラーは R150, R300, R400, R1000 の 4 種である。それぞれの撮影例を図 4-13 に示す。R150 ミラーは角度変化が急であり、画像中の一部

の領域しか本システムでの角度測定可能範囲に入らないため、 R, G, B 値の変化が部分的にしか存在しない。また、一定曲率の凹面ミラーは、曲率半径の半分の値の焦点距離を持つ。カメラと測定対象との距離は 400[mm]程度であり、R150~R400 のミラーではカメラはミラー焦点位置の外側に位置するため、平面ミラーと逆の色相変化（赤が画面左側）が撮影される。一方、R1000 のミラーは、平面ミラーと同じ色相変化（赤が画面右側）が撮影される。しかし、色相変化の方向は測定には影響しない。さて、本システムで使用している色相と入射光線角度との関係式(4.6)は、12~15[deg]の範囲で適切であり、視線方向を一定とした場合、式(4.2)により測定可能な法線方向の幅は 1.5[deg]となる。一方、画面の左右で視線方向の違いが存在しており、今回の実験では画像左端で 9[deg]、画像右端で 17[deg]となる。式(4.2)に代入することにより、画面左端での法線方向の測定可能範囲は 1.5~3.0 [deg]、右端では-2.5~-1.0[deg]ということがわかる。図 4-14 に示すように対象を水平方向に移動させることで、左右の視線方向の違いを活用し、-2.5~ 3.0[deg]の範囲の凹面ミラーの角度変化を測定した。本実験では水平に 2[mm]ピッチで移動して撮影を行い、各位置での撮影

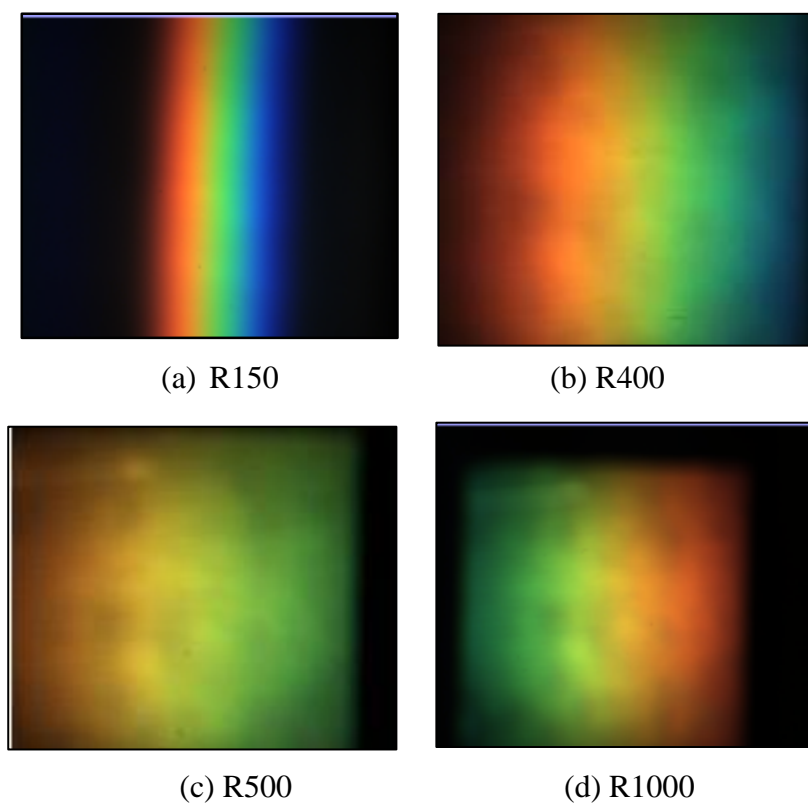


図 4-13 凹面ミラーの撮影例

画像から算出される法線角度を連結している。測定結果を図 4-15 に示す。図 4-15 には、ステージ移動量と画像中の位置により算出した x を用い、理想的な法線角度

$$\theta_{\text{ideal}}(x) = \sin^{-1}(x/R) \quad (4.7)$$

もあわせて図示した。

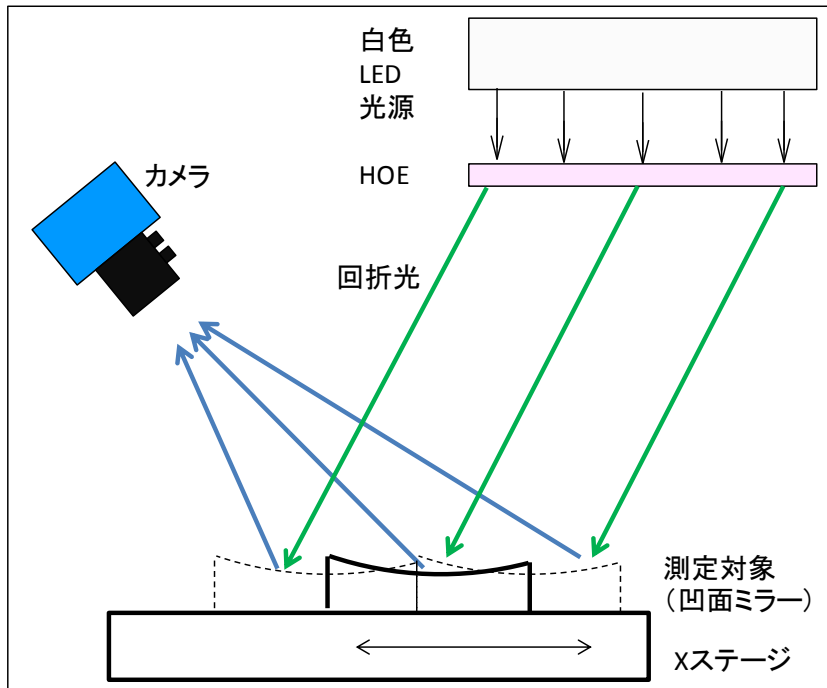


図 4-14 移動ステージを用いた凹面ミラーの測定

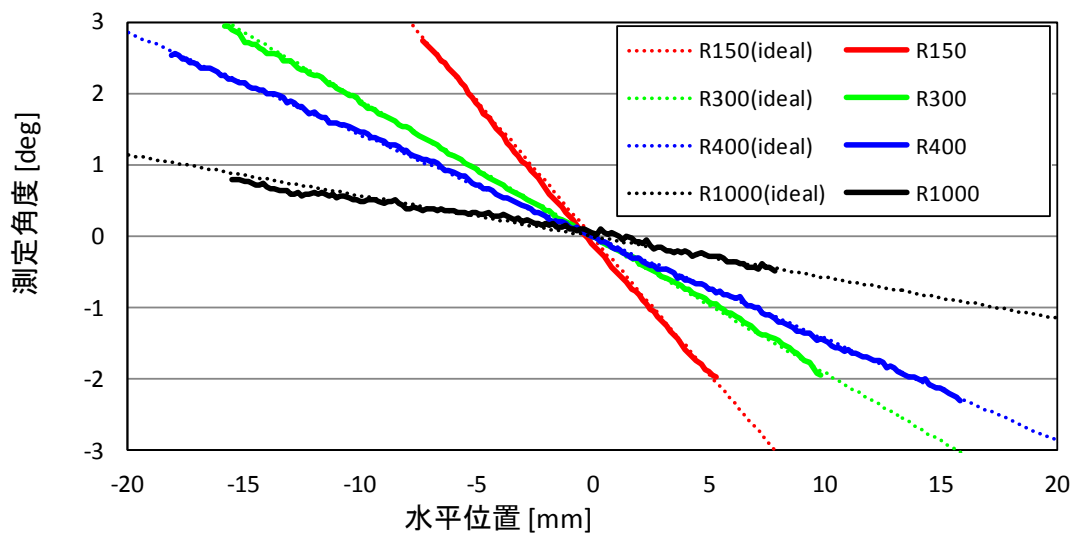


図 4-15 凹面ミラーに対する法線方向の測定結果

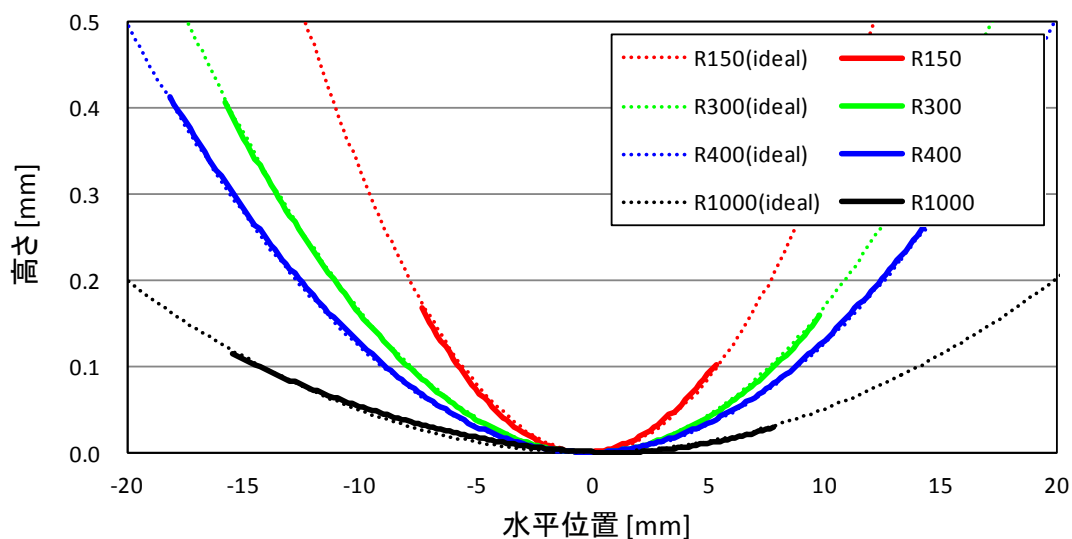


図 4-16 測定された法線方向を用いた形状復元

また、図 4-16 に角度変化を高さに変換したデータを示す。測定値と理論値の平均二乗誤差は $0.08[\text{deg}]$ 以下であり、得られた結果は理論と一致している。

これらの結果から、対象表面が凹面形状を有しており、球面波が収束する場合においても、提案法による法線角度の測定は妥当であることが確認できた。ここでは凹面ミラーを対象に実験を行っているが、凸面は発散する球面波であり、撮像素子の特定位置に照射される光の方向が混合されることはないため、提案法の性能に影響しない。また、変曲点を有する形状の場合でも、凸面と凹面の連結であり、同様に提案法による測定が可能であると考えられる。

4.5 回折と色相

色相の変化は、光が HOE を通過するとき、波長により回折角度に違いが生じることに起因する。本節では、光の波長という観点から提案法の考察を行う。

まず、使用したカメラ (FLIR 社製 Blackfly S Color 5.0 MP、Sony 製 IMX250 センサ使用) の分光感度を図 4-17 に示す^[77]。この図には、各波長での分光感度を基に、式(4.3) から計算された色相も併記した。計算された色相は緑(530[nm])付近で波長変化に対する変化量が小さく、色相 $30[\text{deg}]$ から $210[\text{deg}]$ の範囲の変化は図 4-10 に示されるような線形性は確認できない。以下では、Sony 製 IMX250

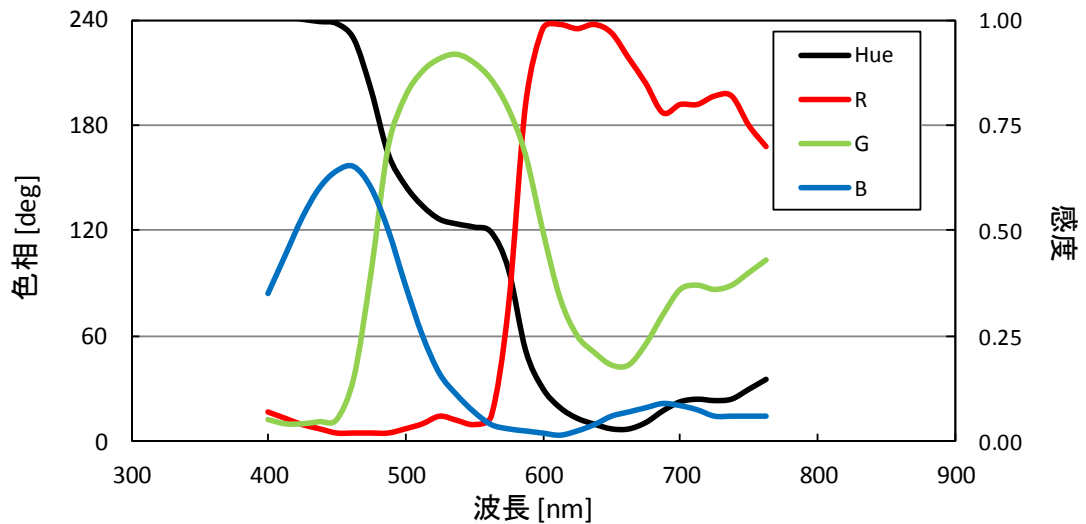


図 4-17 センサ (Sony IMX255) の分光感度と色相換算値

センサを用いた場合 (図 4-17) にも, 補正を行なうことで図 4-10 の結果が得られることを示す.

我々は色相変化の違いの原因を検討するため, 白色 LED 光源と HOE の 1 次回折光の反射光を分光器 (浜松ホトニクス社製 TM-UV/VIS) にそれぞれ直接入力し, スペクトル分布を測定した. 測定した光源自体と角度 12[deg], 13[deg], 14[deg]の位置に分光器を設置した際のスペクトル分布を図 4-18 に示す. 13[deg]ならびに 14[deg]はピーク波長を中心に分布しているが, 12[deg]では 450[nm]から 500[nm]の範囲でブロードなピークを有していることがわかった. 一方, 各角度における波長毎の照度と光源の波長分布との比 (波長効率と呼ぶことにする) χ を図 4-19 に示す. その結果, 各角度での比 χ は sinc 関数の二乗で近似可能な形状となることがわかった. これは Kogelnik の結合波理論で Bragg 回折角度以外への回折光の回折効率が角度を変数とした sinc 関数で表現されること (式(3.23)参照) に類似する.

$$\chi(\lambda; \lambda_B) = \text{sinc}^2\left(\frac{\lambda - \lambda_B}{\Delta}\right) \quad (4.8)$$

ここで sinc 関数は $\text{sinc}(x) = \sin(x)/x$ であり, λ_B は分布の中心であり, 今回は測定した角度を Bragg 角とする波長を式(3.2)により求めた数値としている. Δ は分布の幅を表わすパラメータであり, 今回の実験では $\Delta = 30$ [nm]であった. なお, $\Delta \rightarrow \infty$ の極限では式(4.8)は δ 関数の振る舞いを示す. ここで, $\Delta = 30$ [nm]

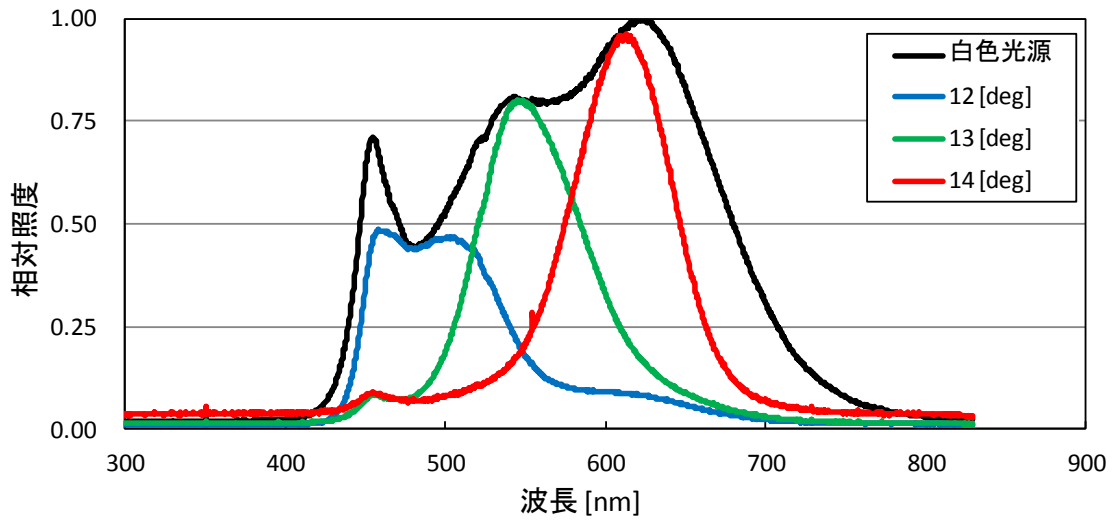


図 4-18 白色光源，及び回折後の光の波長分布

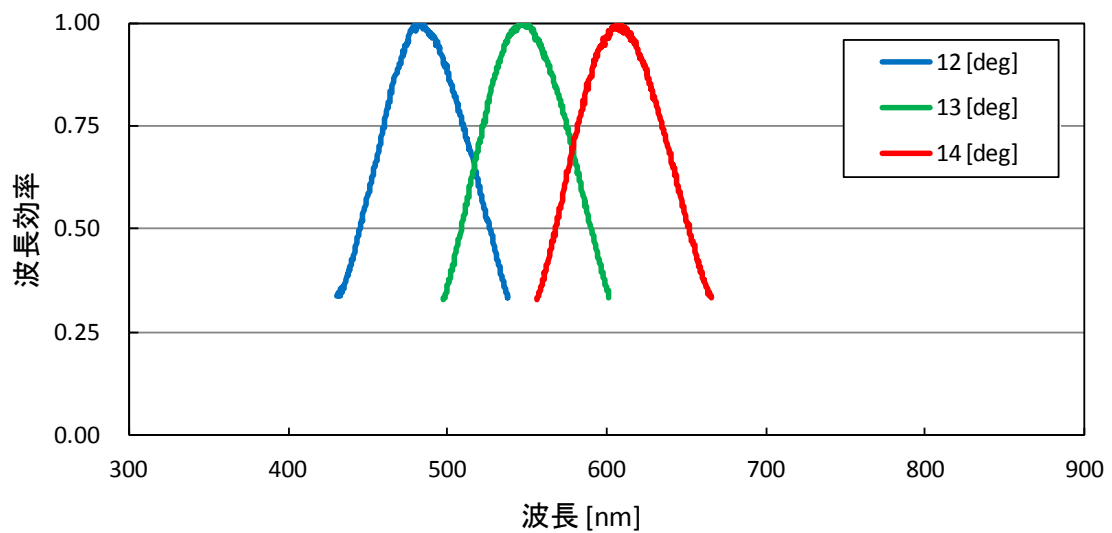


図 4-19 波長効率

の位置であり，この波長の違いは式(3.2)により計算すれば緑($\lambda_B = 532$ [nm])の
 という結果について考察する．式(4.8)が半値となるのは $\lambda - \lambda_B = 1.4\Delta = 42$ [nm]と
 き 1[deg]程度となる．これは図 4-5 に示すレーザーによる実験値に比べ，2.5 倍
 程度の値となっている．これは LED 光源が完全に平行ではなく 1.2[deg]の拡が
 り角を有するため，入射光は垂直以外の方向も存在し，また，HOE 自体の角度
 選択性は図 3.18 の示すとおりの半値幅 5.2[deg]であるため，垂直以外の方向の光
 も回折されることが原因である．

さて，上記を踏まえた上でカメラに受光される輝度について考察する．ホロ

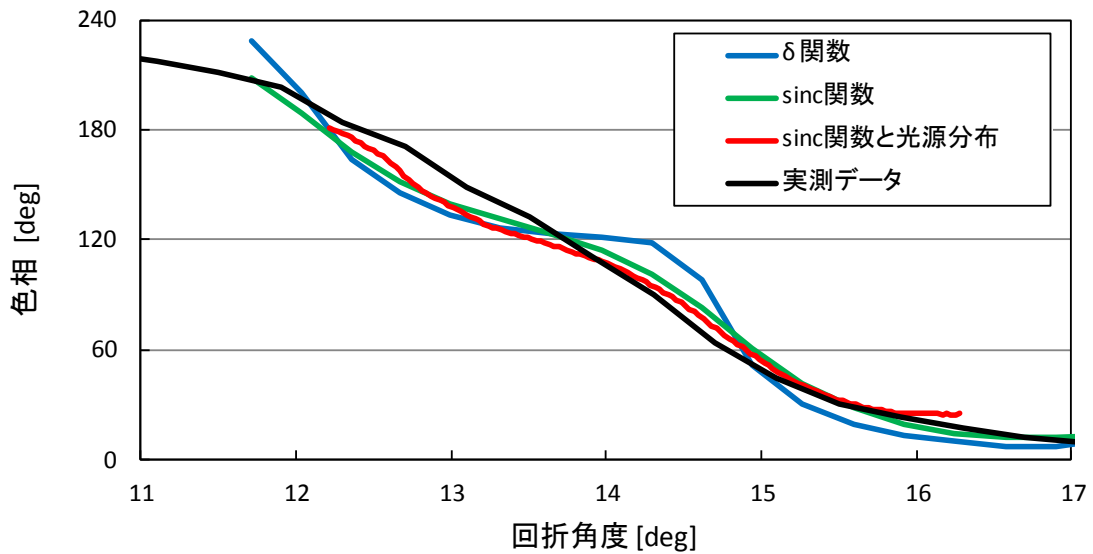


図 4-20 色相変化の計算結果

グラフィック光学素子を用いて θ 方向に回折される光をカメラで受光する場合、輝度は以下の式で表現される。

$$I_{R,G,B}(\theta) = G_{R,G,B} \int S_{R,G,B}(\lambda) \chi(\lambda; \lambda_B(\theta)) I(\lambda) d\lambda \quad (4.9)$$

ここで、 $I_{R,G,B}$ はカメラで受光される輝度で、添字は色を示している。 $G_{R,G,B}$ は各色のカメラゲイン値、 $S_{R,G,B}(\lambda)$ は図 4-17 に示されるカメラの分光感度である。波長効率は式(4.8)であるが、ピーク位置となる Bragg 波長 λ_B は式(2.3)により角度 θ と関連付けられることを明示している。 $I(\lambda)$ は図 4-18 に示される光源の波長分布である。式(4.9)を用いた計算結果と実測データの比較結果を図 4-20 に示す。青線は波長効率を δ 関数とし、光源からは全波長の光が均一に照射されると仮定したときの計算結果である。これは図 4-17 の黒線（カメラの感度特性から求めた色相）と同様に、13[deg]から 14[deg]の範囲で色相の変化が少ない結果を示した。また、光源分布 $I(\lambda)$ を波長について均一とした条件で波長効率 χ の幅を $\Delta = 30$ [nm]とした結果を緑線で示した。波長効率に幅を持たせることで、広い角度で色相変化が観測できるようになることがわかった。また、光源の波長分布 $I(\lambda)$ を図 4-18 の分布とした場合（赤線）は光源分布を均一とした場合（緑線）と大きな差異は認められなかった。また、黒線は図 4-10 に示した実際の撮影結果である。式(4.9)で波長効率 χ に有限の幅を持たせた場合と近い結果が得られた。また、色相 120[deg]以上の領域では実測値が計算値

より大きくなったものの、色相 120[deg]以下の領域（赤～緑）ではほぼ一致した。これらのことから、HOE は色により光線方向を変化させ、表面の法線方向を測定できる効果を有するのみならず、用いるセンサの分光感度特性に起因する色相変化の非線形性を軽減させることができ、安定した測定に効果的であることがわかった。

4.6 まとめ

本章では、HOE 照明を用いた光沢表面の法線方向の角度測定方式を提案した。提案法では、HOE の持つ「波長に応じて回折角度の方向が変化する」という特性を活用している。平面ミラーを回転させることにより、色相と角度との関係性を評価できることを示し、近似式を導入した。平面ミラー及び凹面ミラーを用いて実際に測定を実施し、角度-2.0～2.0[deg]の範囲において、ゴニオ回転設定値と平均角度とのずれの標準偏差は 0.010[deg]、断面全体での角度の標準偏差 0.085[deg]で測定可能であることを確認した。これは光沢表面上に存在する 1[deg]オーダーの角度変化を検出するのに十分な精度である。

これらの実験から、反射光が平面波の場合も、収束する球面波の場合でも、提案法により光沢表面の法線方向の妥当な測定が可能であることがわかる。本章での実験結果を踏まえて考えれば、凸面や変曲点を有する一般の形状に対しても提案法は妥当性を有すると考えられる。

また、分光器を用いて光源の波長特性と実際の回折光の波長分布について調査し、回折光は sinc 関数の二乗で近似できる波長の拡がりを持つことを確認した。また、センサ感度と色相の関係を調べ、回折波長の拡がり測定に有利に働くことを示した。

提案法は 1 枚の画像のみを用いて、光沢表面上の角度変化を 1[deg]オーダーで定量的に評価することが可能である。本稿では平面ミラーの傾き、及び凹面ミラーを対象に実験を行っているが、この手法は塗装表面のブツ不良のような凸面形状や、スクラッチ・塗膜はがれなどの凹面形状にも原理的に対応可能である。また、1 回の撮影で評価が可能であるため、連続的に移動する物体の光沢表面上の凹凸不良検査にも適している。光沢表面を持つ製造物は多く、それらの高品質化に非常に有益な手法が構築できたと考える。

本章では、生産ラインへの適用可能性について検討するため、生産現場での

自動検査で用いられる単板式の産業用カラーカメラを用いて評価を行った。使用するカメラを三板式やマルチスペクトルカメラに変更することにより、より多くの波長情報を得ることができ、提案法はより高い性能となることが期待できる。

一方、提案法は表面での直接反射を対象としている。従って物体を透過し裏面での反射が存在する対象に対しては、全反射するような照射角度を検討した上で HOE の回折角度を設計することや、光源をスリット光として表面と裏面を分離する等の工夫が必要であると考えている。また、拡散反射成分が強く、色がついた表面をもつ対象に対しては、提案法による法線角度の測定性能が低下すると予想される。拡散反射の大きさによる測定性能の変化や色の影響について、今後研究を進めていきたい。

さて、本章で用いた色相と角度との近似式では色相が 30[deg]以下、および 210[deg]以上の領域では測定誤差が大きい。角度測定可能な範囲を広げ、また様々な波長特性を有する光源やセンサで適用するため、非線形領域への対応が望まれる。また、本章で用いた光学系では、角度測定が可能な範囲は 3[deg]となっているが、HOE の青領域と赤領域での回折角度の差をより広くすることで測定可能な範囲を拡張することができる。この目的に合致する HOE を作成し、測定可能な対象を広げたい。また、4.5 節での評価は、カメラレンズによる集光作用については考慮していない。点拡がり関数等を導入することにより、色相と法線角度の関係をより高い精度で記述可能とするよう、式(4.9)を拡張することも今後の研究課題の一つである。

また、法線角度の測定は回折により角度が変化する方向において可能であり、その垂直方向の角度測定はできない。そのため、全方向の法線方向変化を取得するためには、対象や光学系全体を回転させる。または別の方向に回折される HOE を用いる等を行い、測定する法線角度の方向を変更した条件にて、少なくとも 1 回の追加測定が必要となる。一方、ボール等、形状が既知であれば、そのプロファイルにあわせた回折角（例えば特定波長の回折光が円錐状になるもの）を有する HOE を用いることで、1 回での測定が可能なシステムを構築することも可能であると考えられる。今後、これらのレイアウトでの評価を行い、様々な形状に対応した測定システムを構築したい。

第5章 HOE 照明を用いた外観検査

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．

そこで本研究では，光沢物の表面検査に適した検査方式として，ホログラフィック光学素子 (Holographic Optical Element, HOE) を用いるという新しい照明 (HOE 照明) を用いた方式を開発している．第 4 章では，提案法により法線方向の角度の測定が可能であることを，ミラーを用いて実験的に示した．

本章は実際の不良サンプルを対象に，他の照明システムとの比較実験を行い，提案法の有用性を示すことを目的とする．5.1 節では本章での実験に用いた光学系や比較実験の対象とする不良のデータを示す．5.2 節では，同一の不良に対して他の手法にての撮影を行い，その撮影画像を用いて比較を行う．5.3 節では，微小不良に対して大面積照明と比較する．5.4 節では提案法の検査範囲について実験と考察を行う．5.5 節にて本章のまとめと考察を行う．


5.1 実験の構成

実験では，前章と同様の回折特性を有する均一な 120[mm]角の HOE を用いた．指向性の高い平行光を照射する，60[mm]角の白色光源 (パイフォトニクス社のホロライトミニ，表 5.1) の前に HOE を設置することでプリズムのように色変化が生じる HOE 照明を構築した (図 5-1, 5-2) ．本章の実験では，光源の照度ムラを減らし，縦方向は均一色となるように HOE 照明の前面に縦拡散板を設置している．カメラは Imaging Source 社のカラーカメラ (表 5.2) を使用した．カメラと対象間の距離，及び HOE 照明と対象間の距離は 400[mm]とし， $f=50$ [mm]の CCTV レンズを用いて 30[mm]×22.5[mm]の範囲を撮影した．比較実

験では，使用したカメラや位置は変更せず，図 5-1 の白色 LED 光源と HOE，縦拡散板の位置に他の照明を設置している

検査対象は鏡面反射成分の強い，光沢を有する樹脂平板を用い，物体表面上に存在するブツ不良とした．ブツ不良は三角形マーカの先端下側に存在している．ブツ不良の接触式測定により得られた高さ断面を図 5-3 に示す（接触式測定機「東京精密 SURFCOM 1400D」で測定）．幅 0.8[mm]程度の範囲に高さ 8[μm]の突起が存在する．断面グラフより得られたブツの最大傾斜は 3.0[deg]である．

表5.1 光源仕様

メーカー	パイフオトニクス
型番	ホロライトミニ
色	白色
サイズ[mm]	60x60
外観	

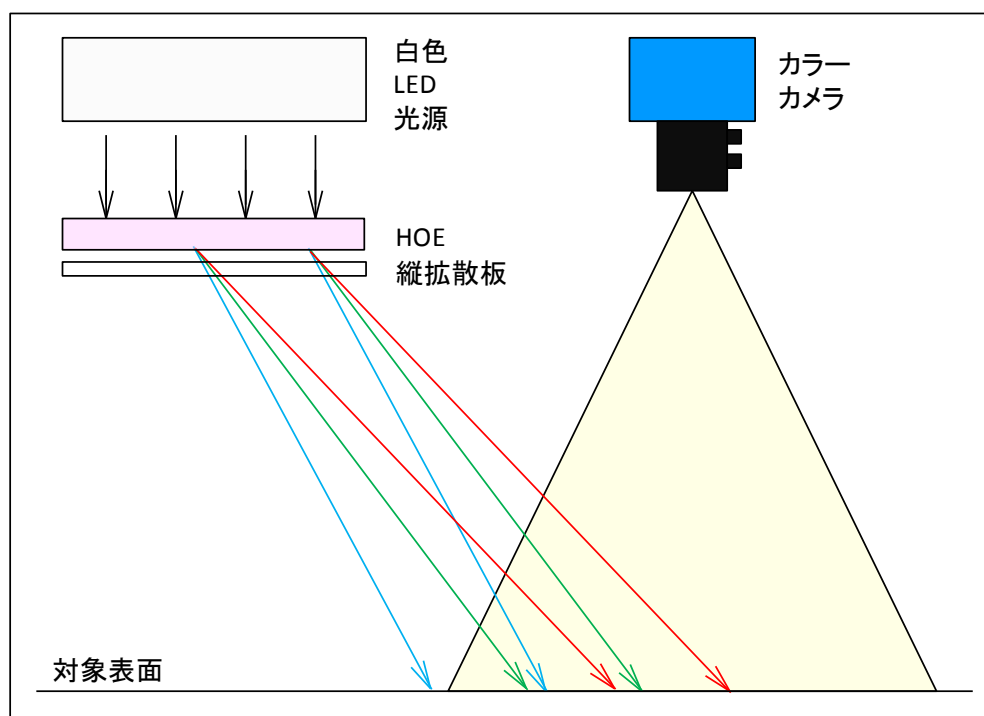


図 5-1 実験での光学系

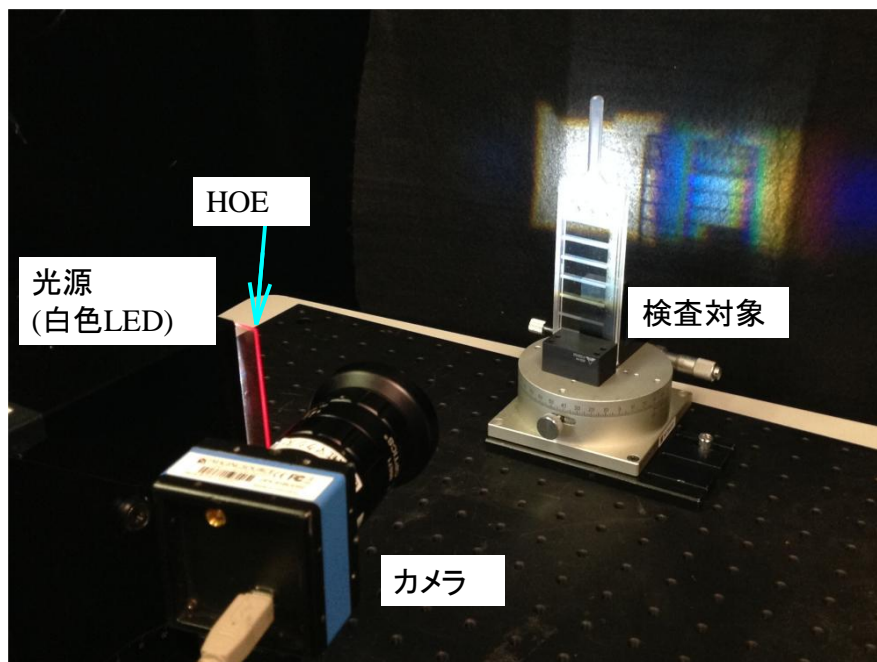


図 5-2 実験の様子

表5.2 カメラ仕様

メーカー	Imaging Source
型番	DFK31-BUC03
画像タイプ	RGBカラー
サイズ[mm]	50.6x50.6x56
画像サイズ[pixel]	1024x768
フォーマット	1/3インチ
外観	

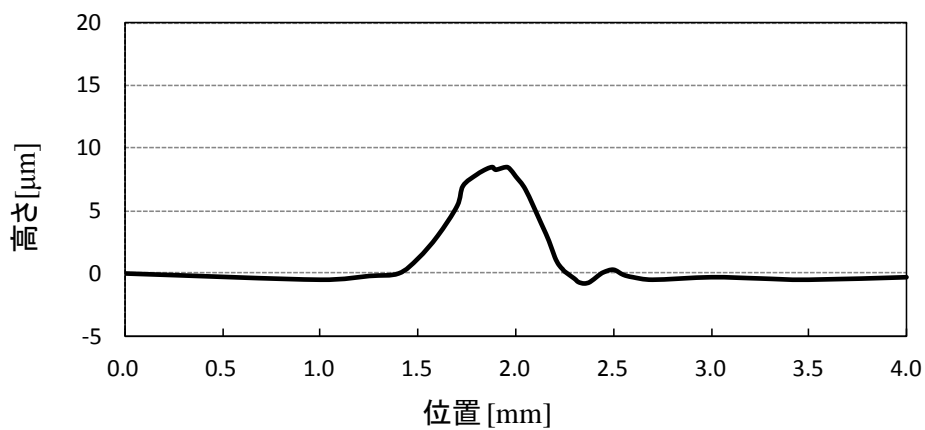


図 5-3 対象としたブツ不良の高さプロファイル

5.2 HOE 照明と既存の照明システムとの比較

本節では、スポット LED 照明、面発光照明、プロジェクタ光源、大面積パターン照明（白黒，矩形），大面積パターン照明（カラー，正弦波），および HOE 照明との比較を行う。

まず，スポット LED 照明の場合の検討を行う．点光源により照射される光は，第 2 章で考察したように，物体表面近傍において


$$L = L(I(\mathbf{k}_{in}(\mathbf{X} - \mathbf{X}_0))) \quad (5.1)$$

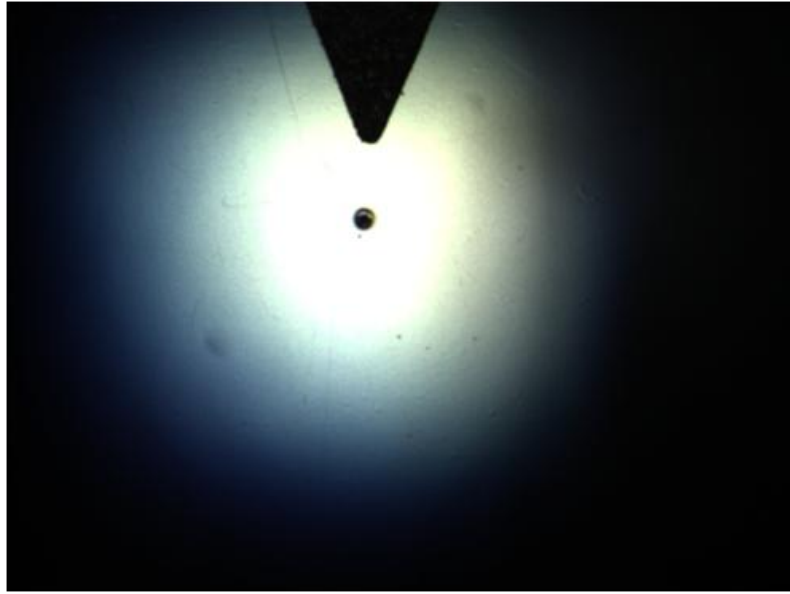
という形で表現される．ここで， I は照度， \mathbf{k}_{in} は照明光の進行方向， \mathbf{X}_0 はスポット LED 照明の位置， \mathbf{X} は対象表面上の位置である．

今回の実験では，スポット LED 照明として JWC 社の投光器（表 5.3）を用いた．実際の不良に対する撮影画像及び，不良部を通る断面データを図 5-4 に示す．なお，カラーカメラでの撮影のため，各画素における R, G, B 輝度のうちの最大値を明度とし，明度の評価を行っている．図 5-4(c) は不良の存在しない近傍での平均明度断面と不良部を通る明度断面との差である．式(5.1)に示されるように，物体表面上の位置に応じて照明光の持つ光線方向が変化し，スポット LED 照明の場合，それにより照度も変化する．また，対象表面での鏡面反射が強いため，撮像に寄与する光の照明光の光線方向は制限される．照度のムラと光線方向の制限のため，撮影画像には大きな明度の変化が存在する（図 5-4(b)）．

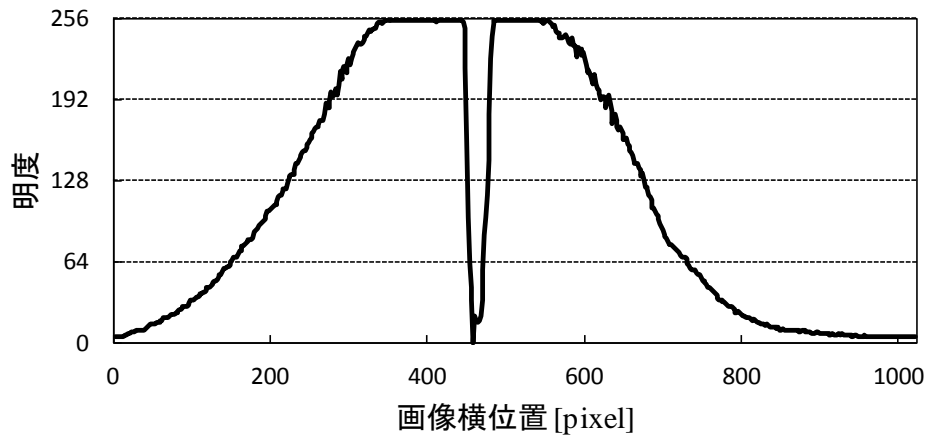
撮影画像において不良箇所は黒く明確に確認でき，断面グラフからも十分に

表 5.3 スポット LED 照明仕様

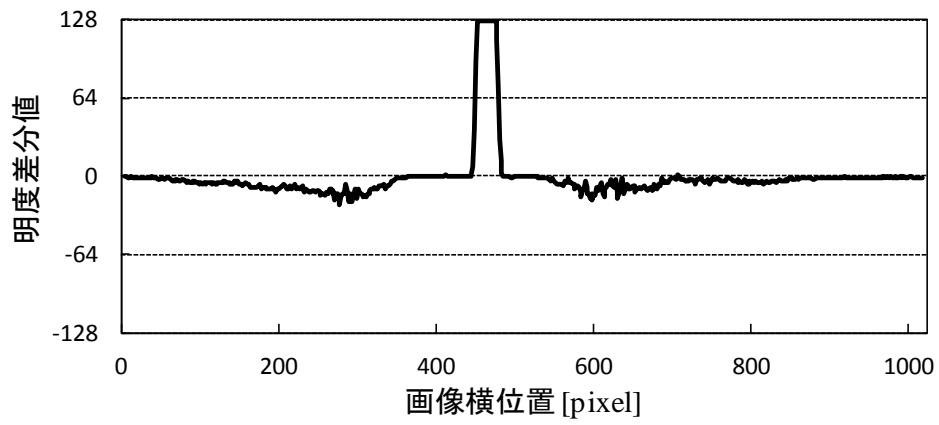
メーカー	JWC
型番	30WハイパワーLED投光器
光源	白色LED
照度[lm]	2,700
サイズ[mm]	223x182x100
外観	



(a) 撮影画像



(b) 明度プロファイル



(c) 縦方向の近傍での平均との差

図 5-4 スポット LED 照明での結果

不良の存在を確認できる．不良のサイズは 0.9[mm]相当であった．しかし，不良部の周辺との明度差と，不良部以外での明度のばらつきにより S/N 比を定義したとき，全体的に明度のムラが存在するため，S/N 比は 21.5[dB]にとどまる．また，十分な照明光が存在する範囲は照明範囲は 10[mm]角程度であり，画面全体で安定した検査を行うことはできない．

次に，面発光照明に対して撮影実験を実施した．面発光照明を表わす光は

$$L = L(I) \tag{5.2}$$


という形で表現され，物体表面近傍には，広い方向からの光が均一な照度で照射される．を光源とした撮影画像，および断面データを示す．使用した光源を表5.4に示す．そのため，図5-5(a), (b)では画面全体に均一な明度を有することが確認できる．しかし，照明の均一性が高いことから，不良部分での明度の変化も小さく，S/N比は19.8[dB]であり，明度変化が生じる範囲も0.2[mm]相当と実際の不良に比べ小さい．

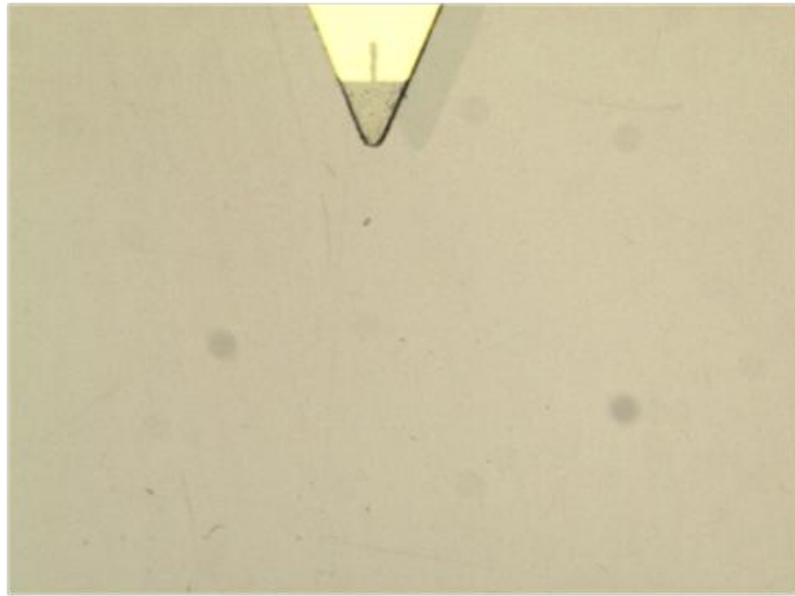
図5-6にプロジェクタ光を用い，縞パターンを物体に照射したケースを示す．使用した光源は3M社のプロジェクタ（表5.5）である．プロジェクタ光は

$$L = L(I(\mathbf{X}), \mathbf{k}_{in}(\mathbf{X} - \mathbf{X}_0)) \tag{5.3}$$

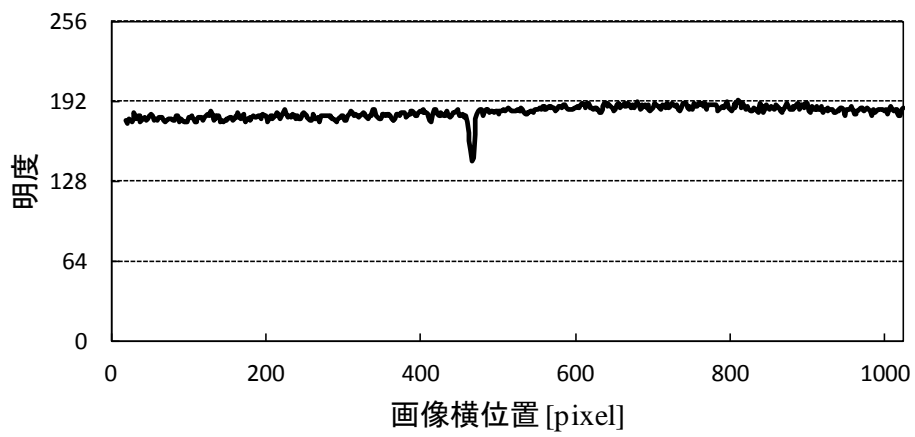
として表現される．式(5.3)は光の方向 \mathbf{k}_{in} の関数であり，対象表面が鏡面反射す

表5.4 面発光照明仕様

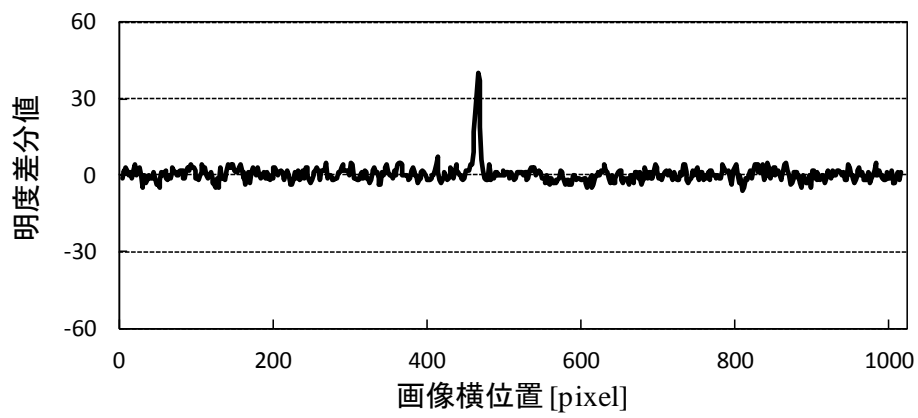
メーカー	アイテックシステム
型番	TMN-150x180-22WD-4
光源	白色LED
サイズ[mm]	215x162x22
発光面[mm]	150x180
外観	



(a) 撮影画像



(b) 明度プロファイル



(c) 縦方向の近傍での平均との差

図 5-5 面発光照明での結果

るため、プロジェクタ光は対象表面の広い範囲に投影されるものの、ごく一部の光しかカメラにより受光することができない。そのため、図5-6(a)は非常に暗い画像になっている。不良部分で強い明度が観察されており、S/N比は39.8[dB]と十分な大きさであった。しかし、明度の変化する範囲は0.2[mm]相当と実際の不良サイズに比べて非常に小さい。ほこり等の存在がある場合でも、同様の明度変化が生じるため、光沢表面の外観検査を目的とする場合には、ノイズと不良の識別が困難であり、この目的の検査用光源としては不適である。

次に、場所により照度が異なる大面積パターン照明を用いて撮影を行った。大面積パターン照明は、その光源位置において


$$L_{\text{src}} = L(I_{\text{src}}(\mathbf{X})) \quad (5.4)$$

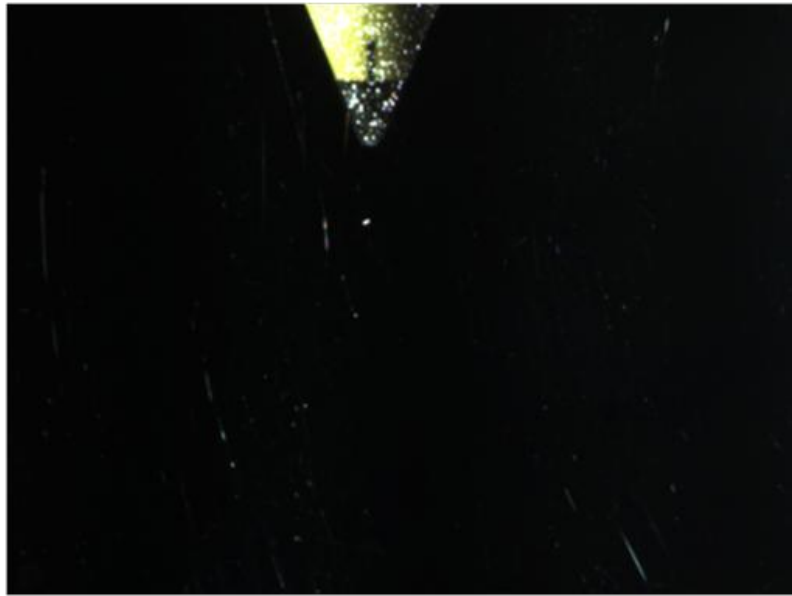
として表現される。2.4.5 節で考察したように、光沢表面を鏡とみなし、カメラが光源自体を観察する、と考えれば、撮影画像での輝度パターンから光線方向 \mathbf{k}_{in} を推定し、対象表面の法線方向の変化を取得することができる。

この実験では、照明光源として LCD モニタを使用した (表 5.6) 。投影するパターンは表 5.7 に示す矩形の白黒パターンとした。図 5-7 に撮影画像と明度断面、周辺と不良部の明度の差を示す。カメラのピントを対象に合わせているため、矩形白黒パターンがぼけているが、不良の識別は可能である。S/N 比 31.3[dB] であり、明度の差を検出したサイズは 0.7[mm]相当であった。

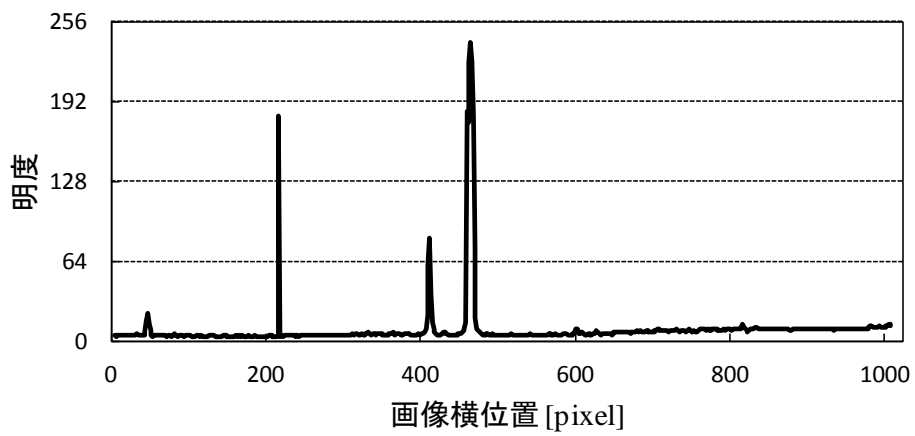
図 5-8 は表 5.8 のカラーパターンを用いた大面積パターン照明を照射したも

表5.5 プロジェクタ光源仕様

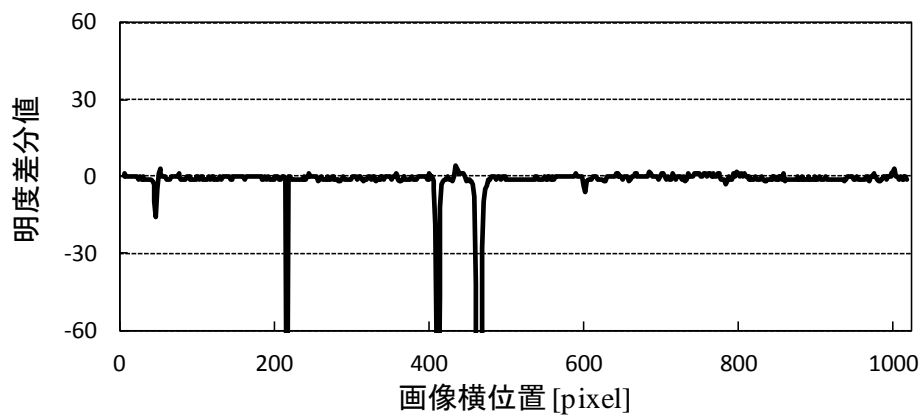
メーカー	3M
型番	MPro150
光源	RGB LED
サイズ[mm]	62x54x10
画像サイズ[pixel]	640x480
照度[lm]	15
外観	



(a) 撮影画像



(b) 強度プロファイル



(c) 縦方向の近傍での平均との差

図 5-6 プロジェクタ光源での結果

表5.6 大面積パターン照明 光源仕様

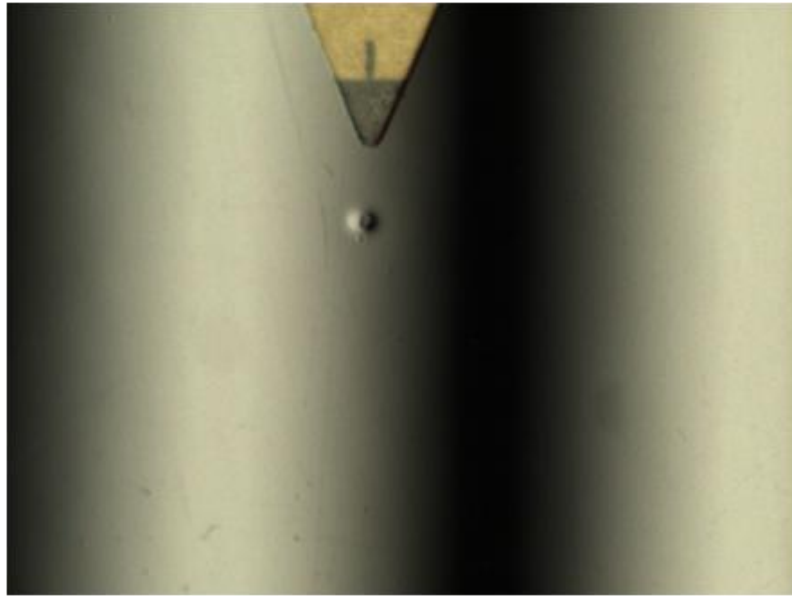
メーカー	LG
型番	FLATRON E2441VX
光源	LED搭載液晶ディスプレイ
サイズ[mm]	569.5x418.5x179.2
画素数[pixel]	1920x1080
発光面[mm]	530x300
外観	

表5.7 投影パターン

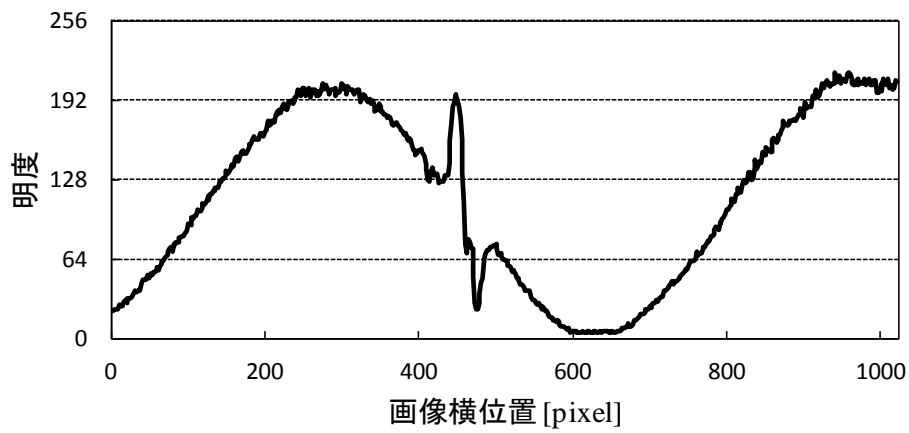
形状	矩形白黒
1周期	67画素
外観	

表5.8 投影パターン

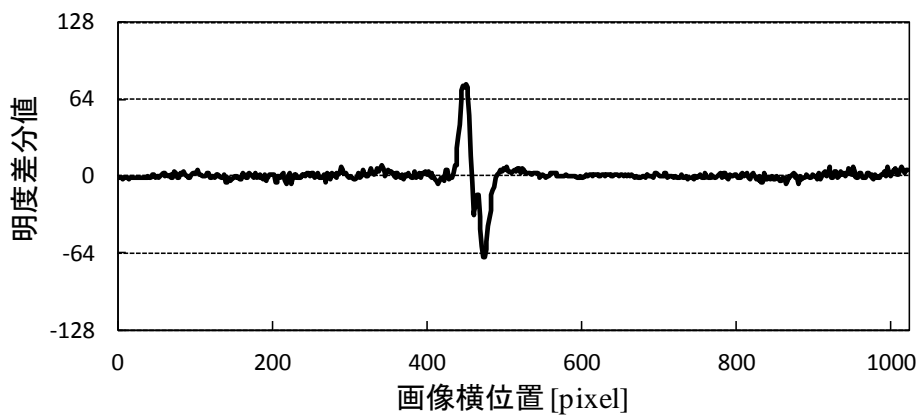
形状	正弦波カラー
1周期	67画素
外観	



(a) 撮影画像

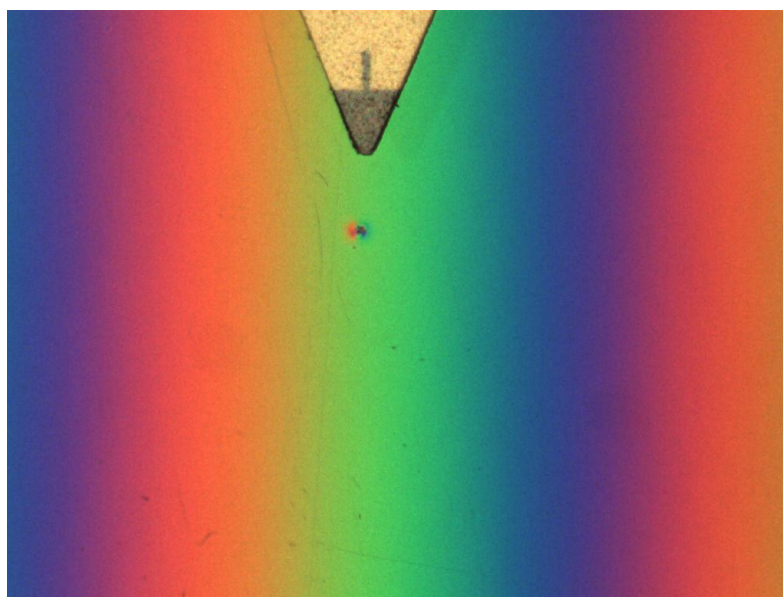


(b) 明度プロファイル

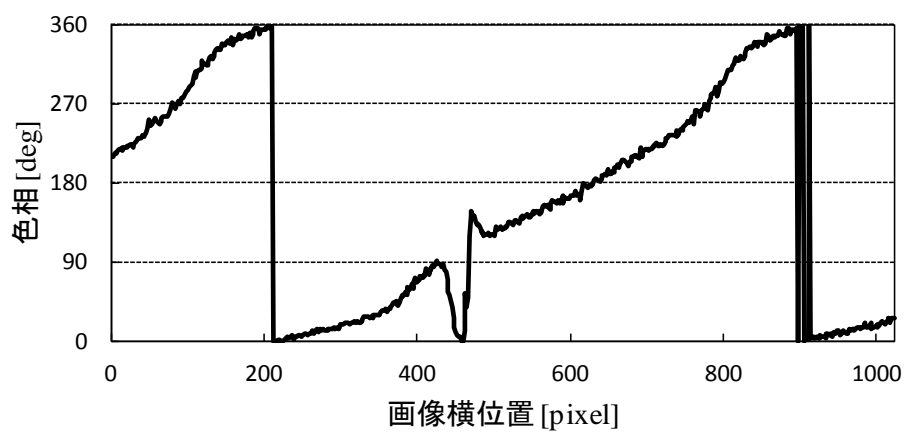


(c) 縦方向の近傍での平均との差

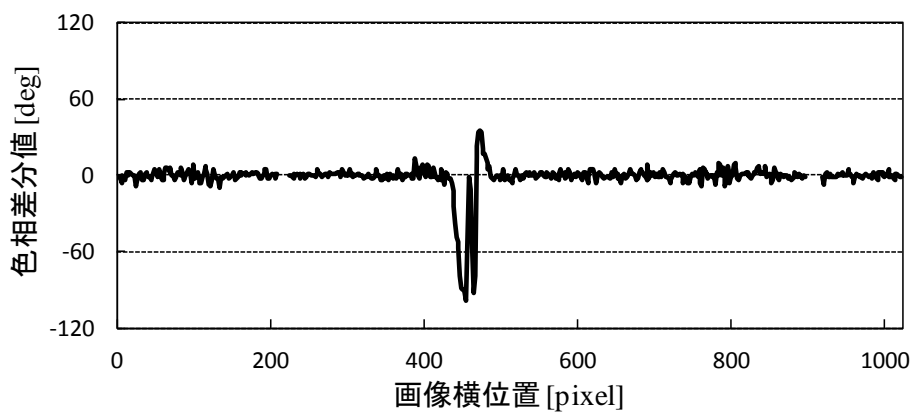
図 5-7 大面積パターン照明（矩形白黒）での結果



(a) 撮影画像



(b) 色相プロファイル



(c) 縦方向の近傍での平均との差

図 5-8 大面積パターン照明（正弦波カラー）での結果

のである。投影したパターンは光源での R, G, B 値を, $2/3\pi$ 刻みで位相をずらした正弦波パターンとした (表 5.8)。なお, 大面積パターン照明の光源は, 図 5-7 の実験と同様に, 表 5.6 の LCD モニタを用いた。この実験では, 今までの実験と異なり, R, G, B のバランスの変化から不良を検出する。そのため, 評価は色相を用いることが妥当である。色相 φ_H は式(4.3)で定義されているが, 改めて式(5.5)として以下に示す。

$$\varphi_H(u, v) = \tan^{-1} \left(\frac{\sqrt{3}(G(u, v) - B(u, v))}{2R(u, v) - G(u, v) - B(u, v)} \right) * 180 / \pi \quad (5.5)$$

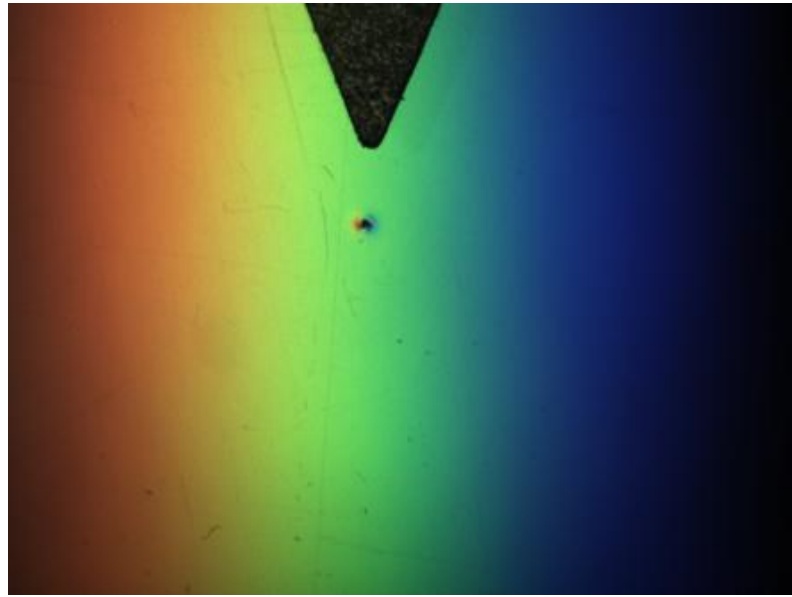
表 5.8 パターンは繰り返しパターンであるため, 図 5-8(b)で確認できるとおり, 色相には $360[\text{deg}]$ から $0[\text{deg}]$ への位相ギャップが存在する。そのため, 周辺領域と不良部の色相差分グラフである図 5-8(c)では, 位相ギャップ部分は除去している。正弦波カラーパターンを用い色相を評価する場合でも, 矩形白黒パターン同様に不良検出が可能であり, S/N 比 $30.3[\text{dB}]$ であり, 色相に差が存在する範囲は $0.6[\text{mm}]$ 相当であった。

最後に, 提案法である HOE 照明による実験を行った。HOE 照明では, 光源からの光が式(3.2)に従って, 波長に応じて異なる方向に回折するため, 回折光を照明光として用いると

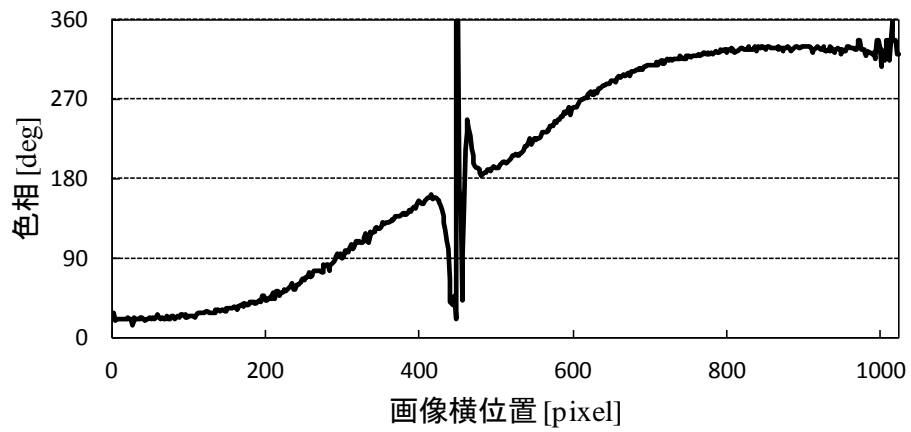
$$L = L(I, \mathbf{k}_{in}(\lambda)) \quad (5.6)$$

として表現することができる。第 4 章において, カメラで撮影される色相と表面の法線方向との間には明確な関連があることを述べた。ここでは, 不良により生じる表面の法線方向の変化の検出, という観点で分析を行う。

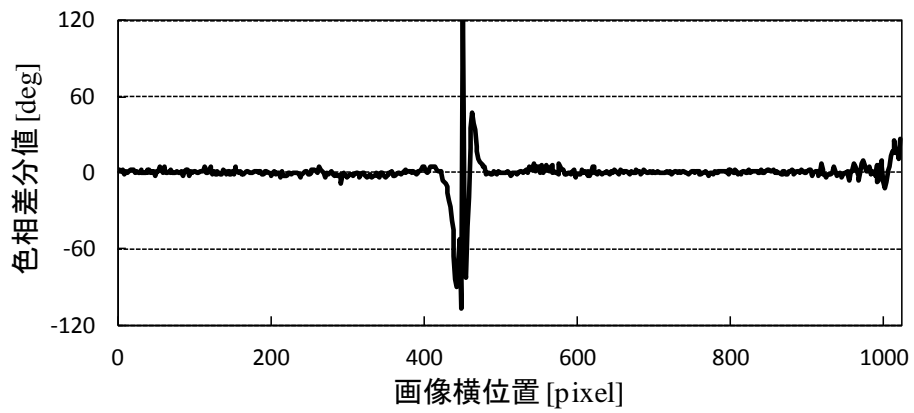
実験では, 表 5.1 に示したパイフォトニクス社のホロライトミニを光源として使用し, 図 3-19 に示される回折角度を有する HOE と縦拡散板を光源前面に設置して実験に用いる照明とした。撮影画像, 不良部を含む断面での色相のプロファイル, 及び周辺領域と不良部の色相の差を図 5-9 に示す。大面積パターン照明での実験と同様に, 不良部分において急峻な色相の変化を確認でき, 不良の検出が可能である。測定された S/N 比は $37.6[\text{dB}]$ であり, 大面積パターン照明にくらべ, $6[\text{dB}]$ 以上大きな値を得ることが出来た。また, 色相の変化が生じている範囲は $0.8[\text{mm}]$ 相当であり, 接触式測定により得られた高さ断面 (図 5-3) と一致する。これらの結果から, HOE 照明が最も高い検査性能を有するといえる。



(a) 撮影画像



(b) 色相プロファイル



(c) 縦方向の近傍での平均との差

図 5-9 HOE 照明での結果

5.3 微小不良に対する外観検査の検討

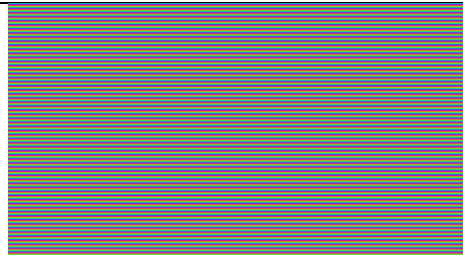
前節において、様々な照明、特に大面積パターン照明と HOE 照明との比較を行った。本節では、不良検出感度の比較を目的として、さらに微小な不良を用いて評価した。不良はブツ不良であり、高さが変化している範囲は 0.4[mm] 程度である。図 5-10 に提案法の撮影画像を、図 5-11 に不良部分の拡大画像と色相差分画像を示す。色相差分画像は、前節と同様の手法で取得している。図 5-11 の色相差分画像から、微小な不良であっても不良部分のみ高い差分値が得られることがわかる。前節と同様に S/N 比を計算した結果、26.2[dB]という結果が得られた。

また、大面積パターン照明（矩形白黒）に対して同一の不良に対する実験をおこなった。撮影画像が図 5-12、拡大画像と明度差分結果が図 5-13 である。不良部以外にも強いノイズが存在し、S/N 比は 18.1[dB]であった。

さらに、大面積パターン照明（正弦波カラー）での実験を行い、図 5-14、及び図 5-15 の結果が得られた。白黒縞パターンに比べ、良好な撮影結果であるものの、S/N 比は 22.2[dB]であり、HOE 照明に比べ、4[dB]低い結果となった。

さて、今回対象とする不良は微小なものであるため、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 5-14、図 5-15 の撮影条件に対し、1/4 の周期を持つ正弦波カラーパターン（表 5.9）を投影した。図 5-16 がそのときの撮影画像であり、図 5-17 は拡大画像と色相差分画像である。撮影画像は、全体がほぼ白色であり、R,G,B の変化はほとんど確認できない。これは 2.4.5 項で考察したように、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、R,G,B 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、不良を検出することはできなかった。

表5.9 投影パターン

形状	正弦波カラー
1周期	17画素
外観	

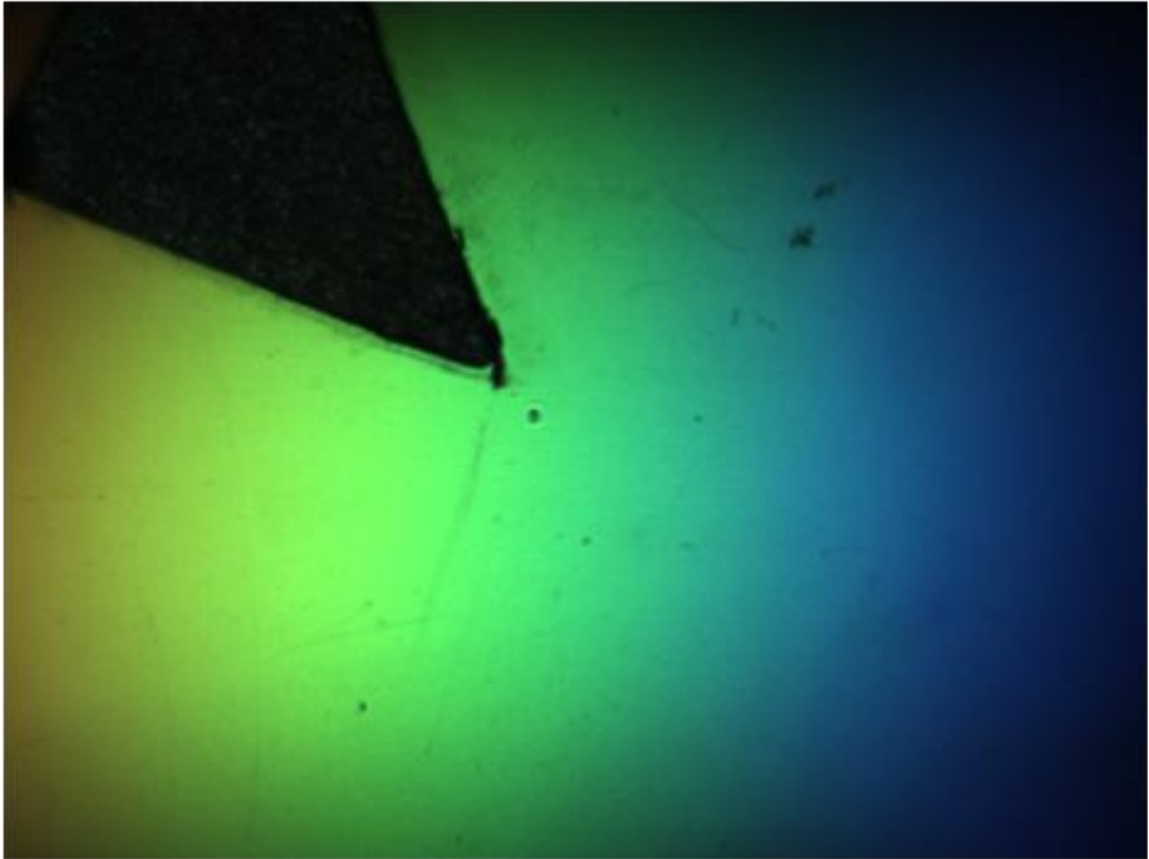
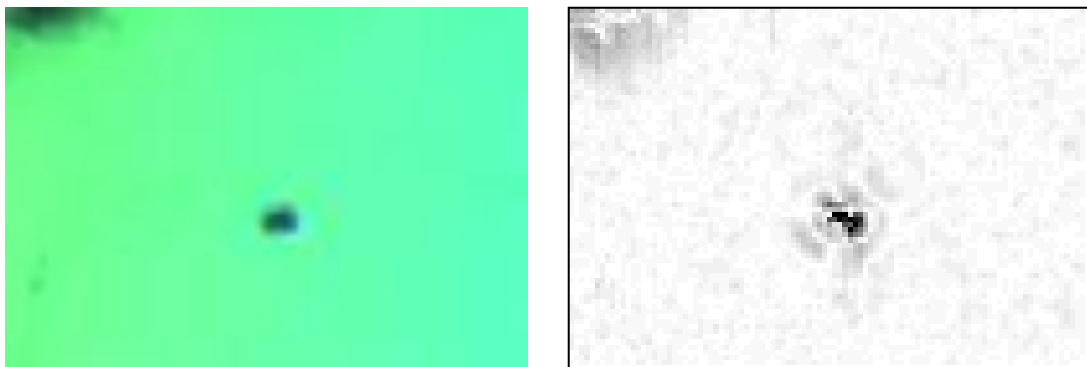


図 5-10 微小なブツ不良の HOE 照明による撮影画像



(a) 不良部の拡大画像

(b) 色相差分結果

図 5-11 微小なブツ不良の拡大画像, 及び色相差分画像

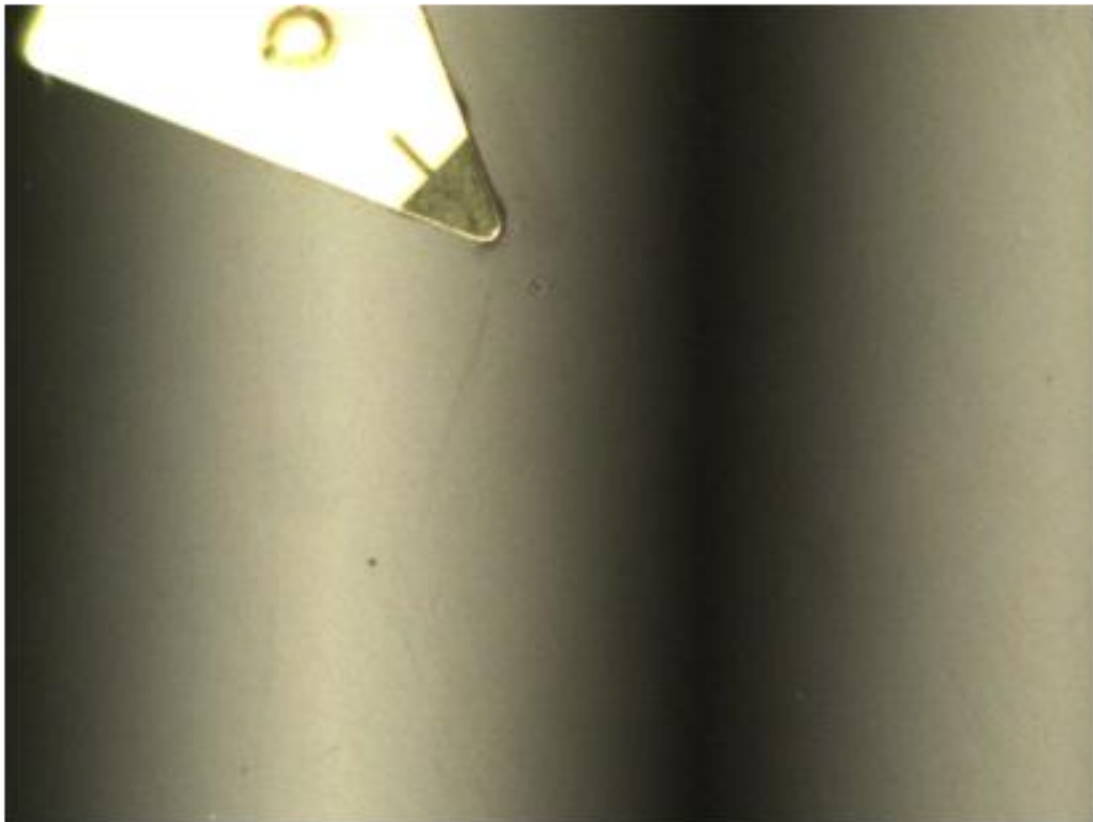
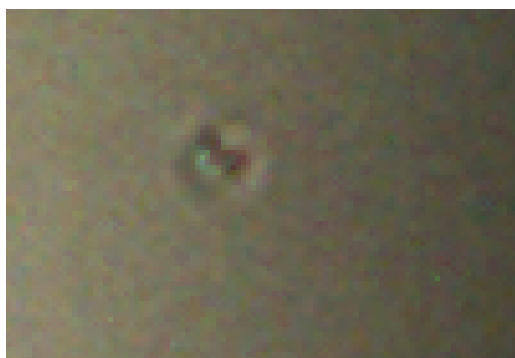
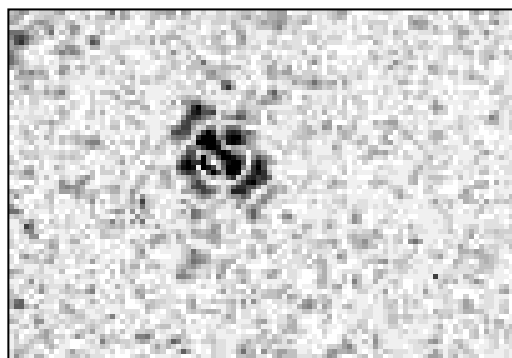


図 5-12 大面積パターン照明（白黒，矩形）による撮影画像



(a) 不良部の拡大画像



(b) 明度差分結果

図 5-13 微小なブツ不良の拡大画像，及び明度差分画像

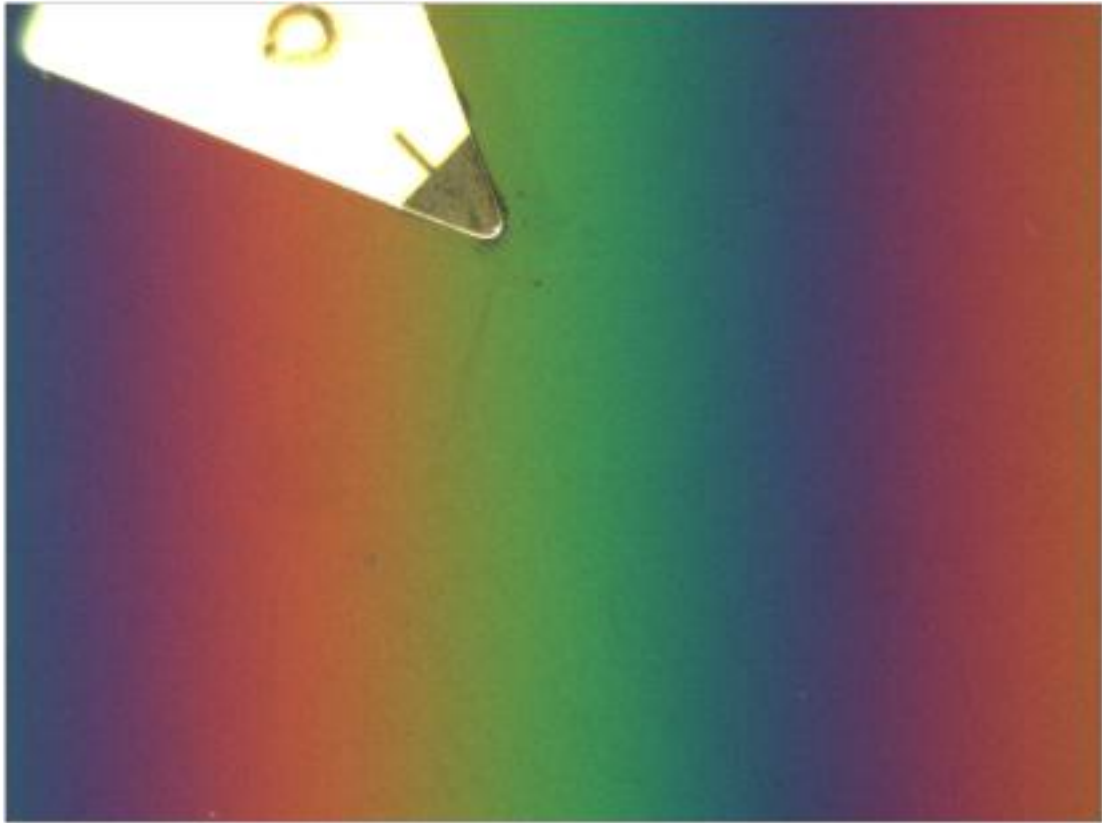
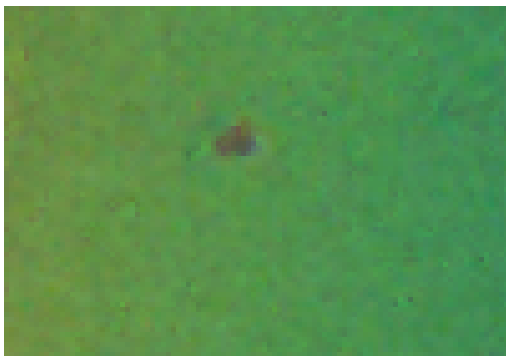
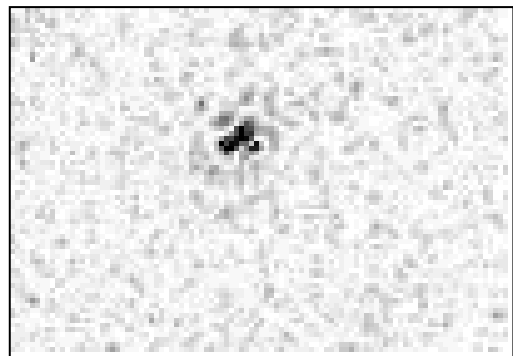


図 5-14 大面積パターン照明（カラー，正弦波）による撮影画像



(a) 不良部の拡大画像



(b) 色相差分結果

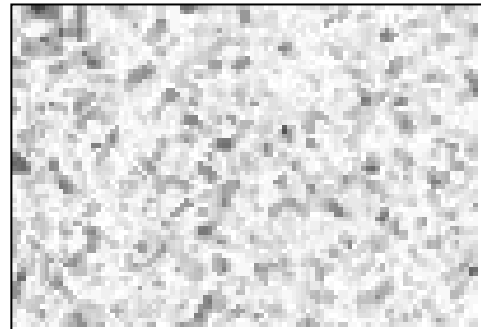
図 5-15 微小なブツ不良の拡大画像，及び色相差分画像



図 5-16 1/4 周期正弦波カラーパターンによる撮影画像



(a) 不良部の拡大画像



(b) 色相差分結果

図 5-17 微小なブツ不良の拡大画像，及び色相差分画像

表5.10 不良検出性能

光源	0.8mm S/N比 [dB]	0.4mm S/N比 [dB]	不良 サイズ [mm]	備考
スポットLED	21.5	—	0.9	光量ムラ大
面発光	19.8	—	0.2	S/N比低
プロジェクタ	39.8	—	0.2	ノイズとの識別難
大面積（白黒）	31.3	18.1	0.7	
大面積（カラー）	30.3	22.2	0.6	
HOE	37.6	26.2	0.8	

5.2 節，5.3 節の結果を表 5.10 にまとめる．これらの評価実験から，光沢表面の不良検査において，提案法である HOE 照明が，比較した他の照明方式に対して最も高い不良検出能力を有することが確認された．

5.4 HOE 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．5.2 節で使用した 0.8[mm]幅のブツ不良を画面左から右に移動させながら撮影を行った．ブツ不良が画面左の赤色領域にある場合（図 5-18, 5-19），画面中央の緑色領域にある場合（図 5-20, 5-21），画面右の青色領域にある場合（図 5-22, 5-23）をそれぞれ撮影した．図 5-24 は，各不良位置での色相差分値の横断面グラフである．不良の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．この結果は一回の撮影にて広い範囲の不良検査が可能であることを示しており，接触式を含めた他の測定手法に比べ，格段に速い検査速度を実現可能である．さらに，用いるの単一画素での色相であり，従来法である干渉法やテクスチャ解析が必要な大面積パターン照明に比べて，少ない計算コストで高精細な検査が実現可能である．

しかし，不良が右側の青色領域にある場合（図 5-23），不良の右側部分が検出できていない．これは，対応する光がカメラの感度外の波長となることが原因である．この課題は，複数の回折角度を有する HOE を併用することで解決可能であり，今後の応用研究が期待される．

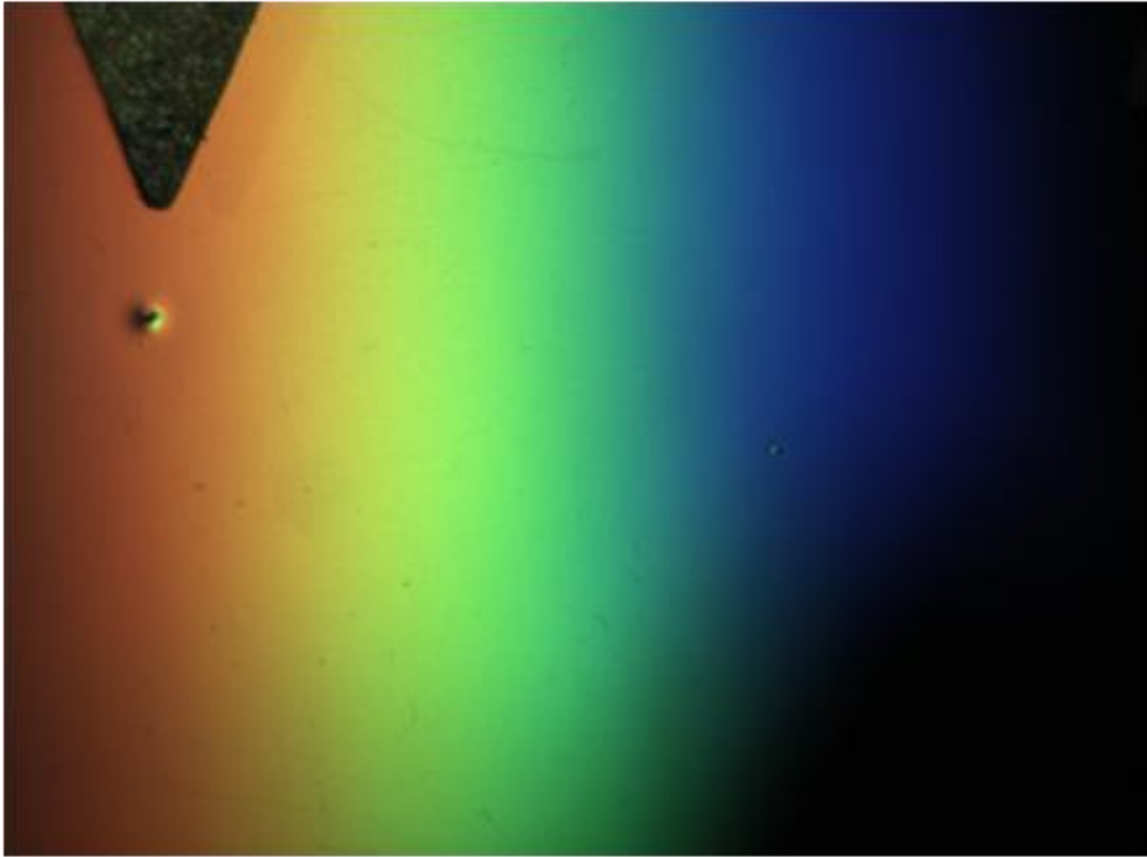
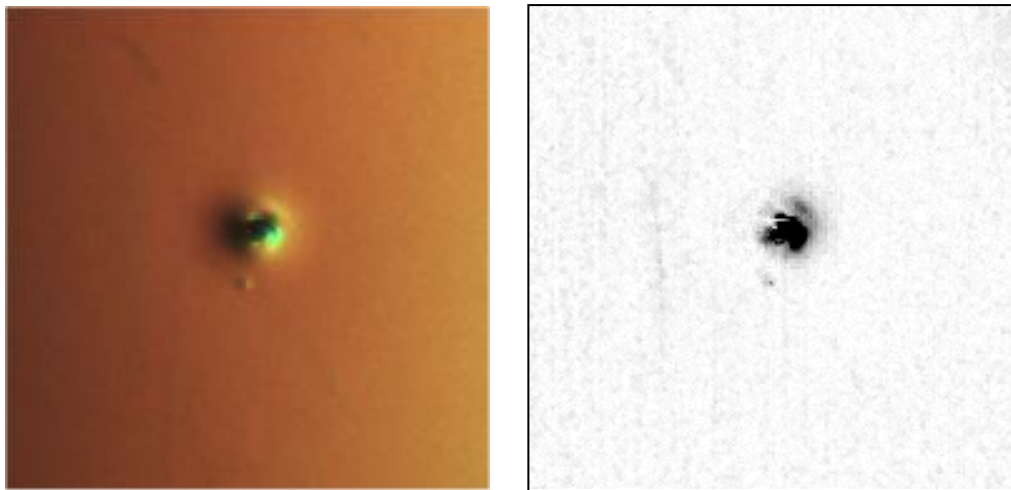


図 5-18 撮影画像（不良位置：左）



(a) 不良部拡大画像

(b) 色相差分画像

図 5-19 拡大画像と色相差分画像（不良位置：左）

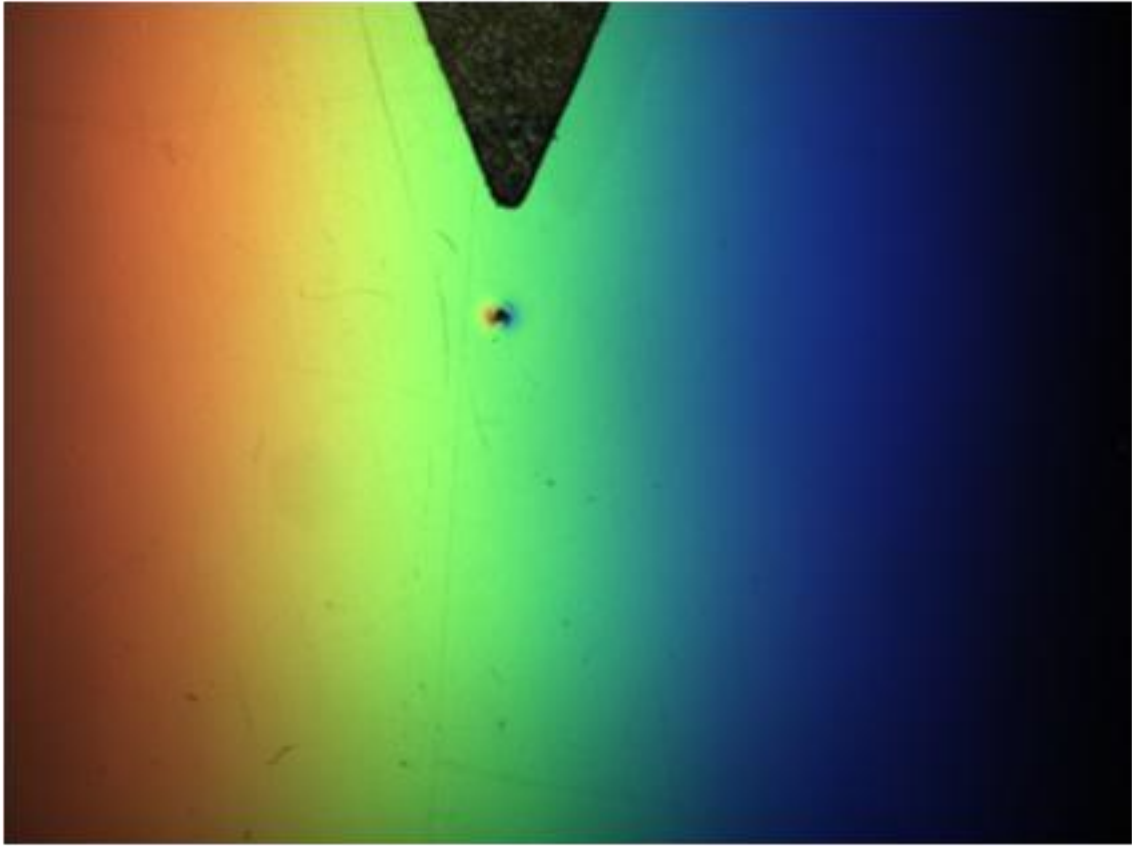
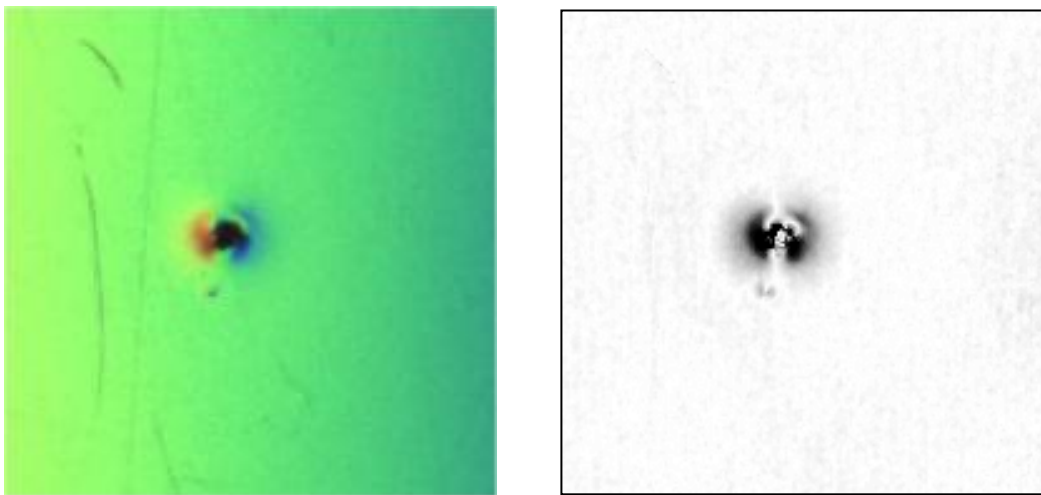


図 5-20 撮影画像 (不良位置：中央)



(a) 不良部拡大画像

(b) 色相差分画像

図 5-21 拡大画像と色相差分画像 (不良位置：中央)

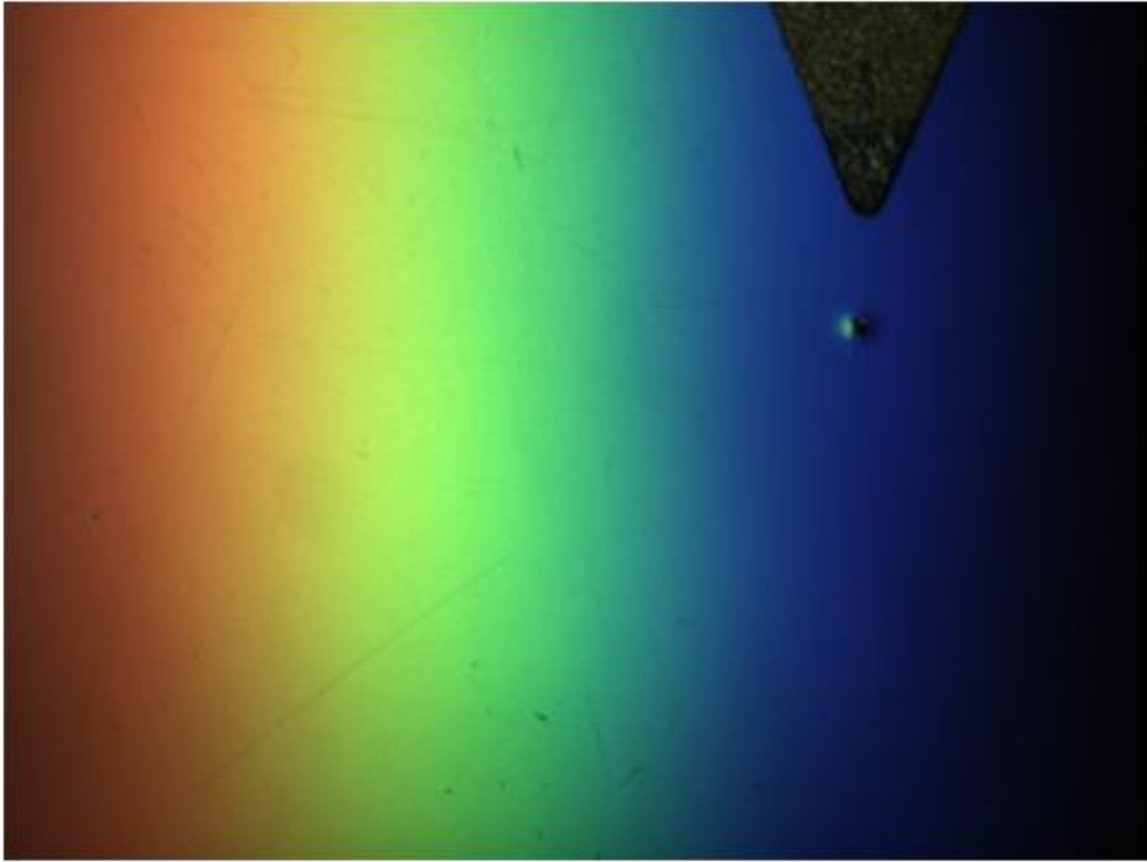
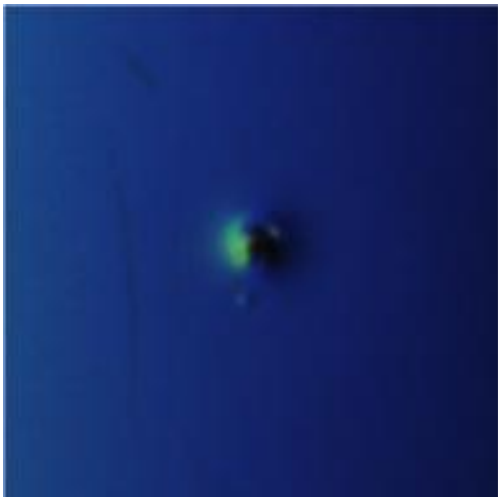
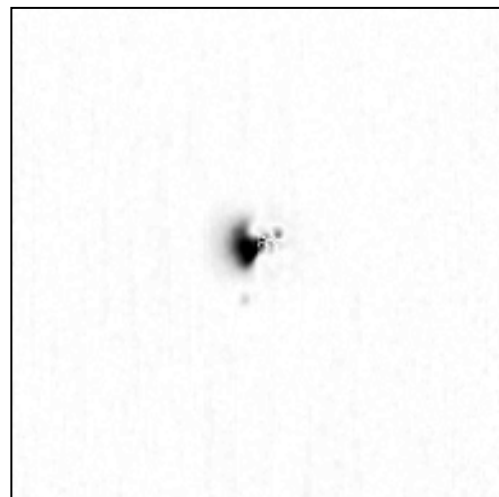


図 5-22 撮影画像（不良位置：右）



(a) 不良部拡大画像



(b) 色相差分画像

図 5-23 拡大画像と色相差分画像（不良位置：右）

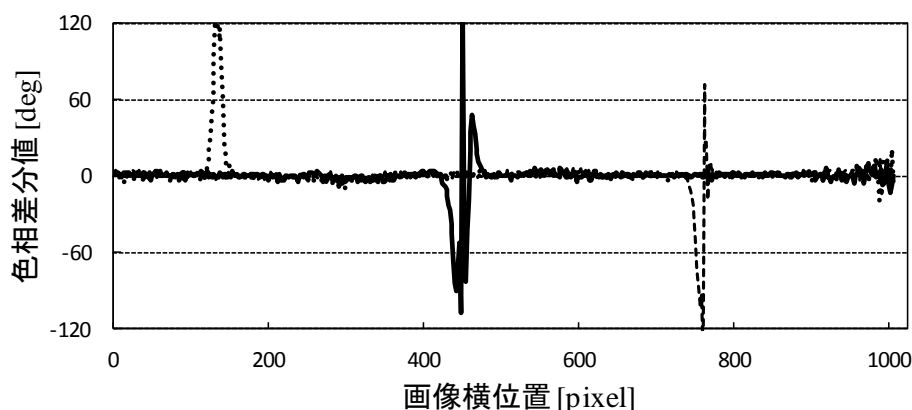


図 5-24 各不良位置での色相差分量

5.5 まとめ

本章では、HOE 照明を用いた光沢表面に対する外観検査システムについて延べた。対象は光沢表面を有するアクリル板上に存在する幅 1[mm]以下のブツ不良とし、複数の照明方式による撮影画像と HOE 照明を用いた方式での撮影画像の比較を行った。

スポット LED 照明の場合、照明位置と不良位置とが一致する場合、検査が可能であるものの、その照明範囲は 10[mm]程度であり、広い範囲での安定した検査は困難であることを確認した。また、プロジェクタによる投光の場合、散乱反射を持つ対象であれば像を結び、カメラによる撮影が可能であった光も、光沢面ではその光はカメラ以外の位置に反射されるため、暗い画像しか取得できず、検査には適さない画像となった。面発光照明の場合には、広い角度範囲の入射光が存在するため、カメラにより反射光を受光することは可能だが、正常部分と不良部分のどちらも同じ程度の反射光量となるため、この方式も検査には不適であることを確認した。

更に、矩形白黒パターン、及び正弦波カラーパターンを用いた大面積パターン照明と HOE 照明の比較を行った。幅 0.8[mm]のブツ不良に対して S/N 比を計算し、矩形白黒パターンでは 31.3[dB]、正弦波カラーパターンでは 30.3[dB]、HOE 照明 37.6[dB]という結果を得られた。これらの結果は、検査した不良に対して、HOE 照明が最も良好な不良検出性能を有することを示している。

また、幅 0.4[mm]のブツ不良に対して同様の評価を行った。その結果、矩形

白黒パターンでは 18.1[dB]、正弦波カラーパターンでは 22.2[dB]、HOE 照明 26.2[dB]であり、この不良についても HOE 照明が最もよい性能であることを確認した。カラーパターンの変化量と不良のサイズとの関係を考慮し、より細かいカラーパターンも投影したが、照明面でのピントぼけの影響により、撮影画像では *R,G,B* が混色し、検査することはできなかった。一方、HOE 照明の場合は、4.5 節で考察したとおり、異なる波長の光が受光された場合も、色相への影響は少なく、むしろ色相と入射光の方向との関係を線形性にする効果がある。そのため、HOE 照明は対象にピントを合わせた検査が可能であり、この点においても提案法は微小な不良の検査に適していると考えられる。大面積パターン照明の場合、投影するパターンを最適化する、または複数のパターンを投影することにより、今回の結果より高い検出性能となる可能性は存在する。しかし、大面積パターン照明は RGB に代表される数波長の光源の照度バランスにより色を表現する一方、HOE 照明の場合は照射角度に応じて連続的な波長変化を持つ光線を物体に照射する。この点からも、HOE 照明は大面積パターン照明に比べ高い検出性能を有すると言える。

更に、撮影画像中の不良の位置に対する検討を行い、正常部分の色相に依らず検査可能であることを確認した。本章で確認した HOE 照明の性能、及び特性は、従来裸眼目視で検査されている、量産製造ラインでの部品に対する検査に適していると考えられる。

第6章 HOE 照明の応用例

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。6.1節では利便性の向上を目的として試作した、持ち運び可能なハンディ HOE 照明ユニットについて説明する。6.2節では、検査領域が不良が存在しない場合、同程度の色相になる均一 HOE 照明ユニットを紹介する。さらに、6.3節では白色のスポット LED を光源として用い、回折光とカメラが同軸となるレイアウトされた同軸 HOE 照明ユニットについて記載する。本章では、ホログラフィック光学素子 (Holographic Optical Element, HOE) を含んだ照明 (HOE 照明) とカメラを組み合わせたこれら光学系を HOE 照明ユニットと呼ぶことにする。

6.1 ハンディ HOE 照明ユニット

利便性向上を目的として、横幅 60[mm]、奥行き 120[mm]、高さ 250[mm]のハンディタイプのユニットを試作した(図 6-1)。本研究では、これをハンディ HOE 照明ユニットと呼ぶことにする。光学系は前章の構成(図 5-1)と同様であるが、検査範囲は 11[mm]とした。カメラ、モニタ、HOE 照明ともにバッテリー駆動であり、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。光源はスポット LED 照明 (表 6.1) を用い、その前面に 1 インチの単レンズ (表 6.2) を設置し、光の平行化を行う。レンズ前面に 30[mm]のプリズム型 HOE を設置することで、前章までに示した HOE 照明の機能を持たせることができる。撮影制御装置、及び撮影カメラとして、Raspberry Pi、及び Raspberry Pi のカメラモジュールを使用した (表 6.3)。また、撮影直後に画像の妥当性を確認できるよう、Raspberry Pi に対応したディスプレイ (表 6.4) も有する。

検査員が簡便に不良を撮影できるよう、アタッチメントを設けた。アタッチメントと対象を接触させることにより、検査員の熟練度に依らず、不良部分の HOE 照明による撮影が行うことができる。なお、陰影により不良を認識することが目視による不良の確認の確認に有利である、という事前調査を元に、撮影に用いる回折光の主となる波長を青色としている。

上記のような構成により、ハンディ HOE 照明ユニットを用いることで表面が曲率を有する部品も含め、製造現場での簡便な不良撮影を可能にしている。

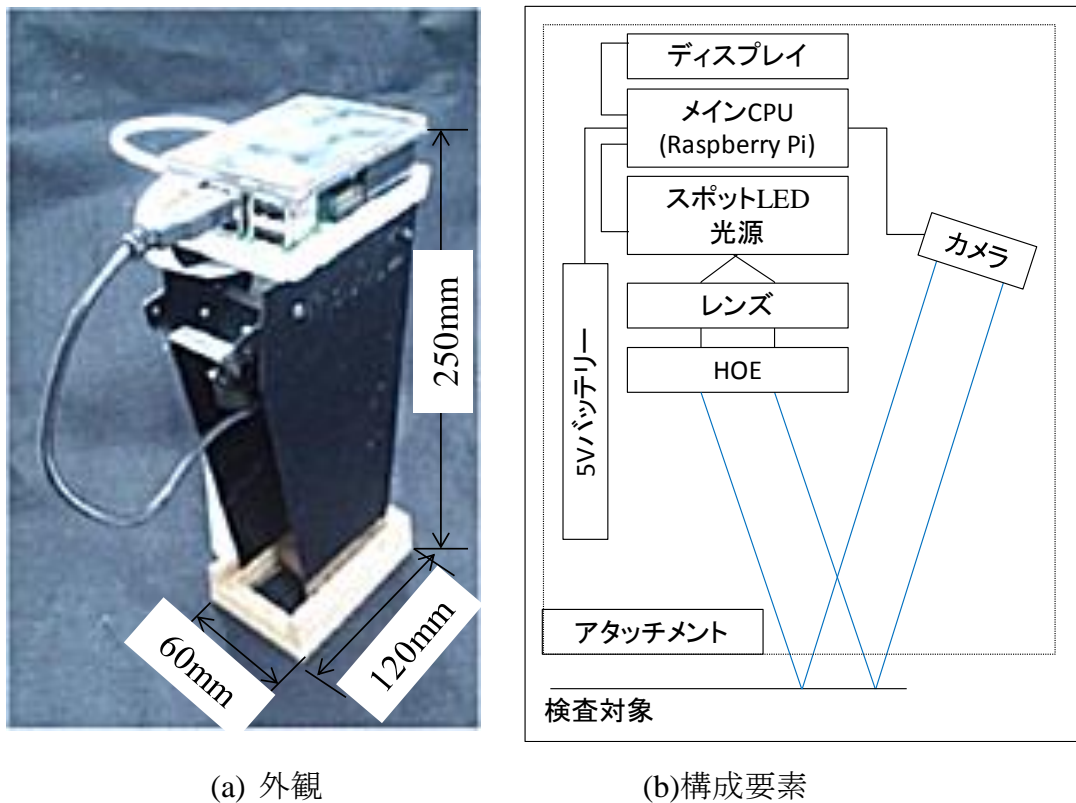


図 6-1 ハンディ HOE 照明ユニット

表6.1 スポットLED光源

メーカー	日亜化学
型番	NVSW119CT
波長 [nm]	白色LED
サイズ[mm]	60x60

外観

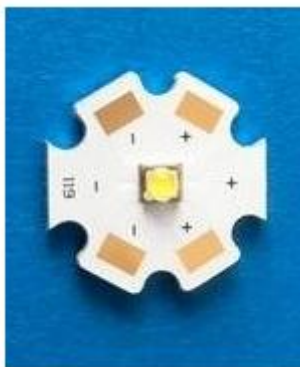


表6.2 レンズ

メーカー	エドモンドオプ ティクスジャパン
型番	#63-560
波長 [nm]	TS 両凸
サイズ[mm]	Φ40
焦点距離[mm]	40
外観	

表6.3 カメラ



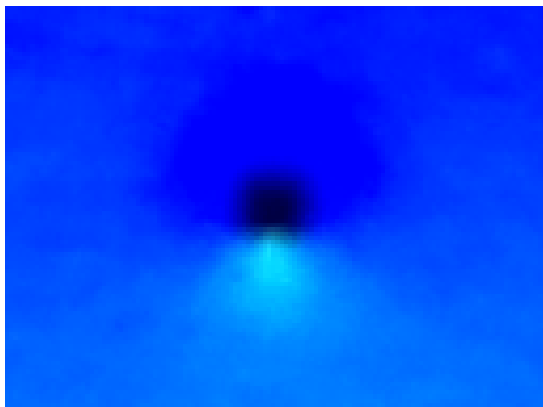
メーカー	RaspberryPi
型番	RaspberryPi Camera Module V2
画像タイプ	RGBカラー
サイズ[mm]	60x60
画素数	3280x2464
外観	

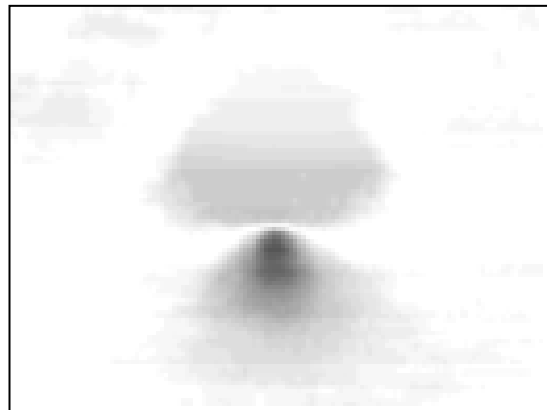
表6.4 ディスプレイ

メーカー	OSOYOO
型番	HDMI 3.5インチディスプレイ
画素数	480x320
サイズ[mm]	86x56
外観	

さて、製作したハンディ HOE 照明ユニットを用いた撮影画像について評価を行う。対象は、曲率を有する樹脂成形部品の表面上に存在する2種のブツ不良(A, B)とした。サンプルとした不良 A は幅 0.6[mm]程度、不良 B は幅 1.4[mm]程度の大きさである。図 6-2 には、不良 A に対して本ユニットにて撮影した画像、及び第 5 章と同様の処理による色相差分画像である。図 6-3 は不良 B に対する同様の画像である。第 5 章のサンプルと異なり、今回対象とした不良は曲率を有する表面上に存在しているが、ハンディ HOE 照明ユニットを用いたを用いることにより、撮影画像、色相差分画像ともに不良部のみが明瞭に確認できる。

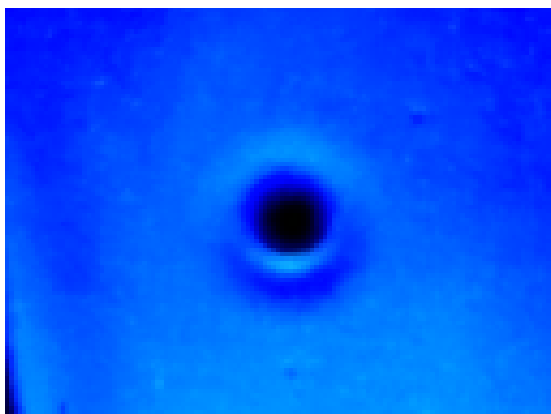


(a) 撮影画像

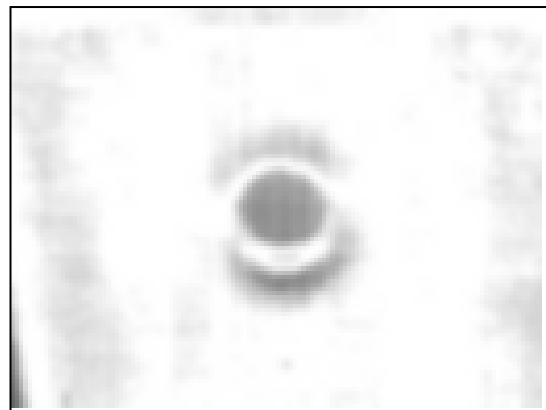


(b) 色相差分画像

図 6-2 不良部分の画像と色相差分画像 (A)



(a) 撮影画像



(b) 色相差分画像

図 6-3 不良部分の画像と色相差分画像 (B)

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、塗装時に物体表面に油滴等が存在するとき、その場所に塗料が付着しなくなることが原因で生じる。従って、ハジキ不良はブツ不良とは異なり、不良形状は凹んでいる。接触式測定機での高さ断面を図 6-4 に示す。塗装膜厚に相当する 20[μm]の凹みが存在しており、最大傾斜は 4.2[deg]であった。ハジキ不良をハンディ型 HOE 照明ユニットにより撮影した画像、及び色相差分画像を図 6-5 に示す。凹み形状を有するハジキ不良に対しても、HOE 照明を用いることにより明瞭に確認できることがわかる。

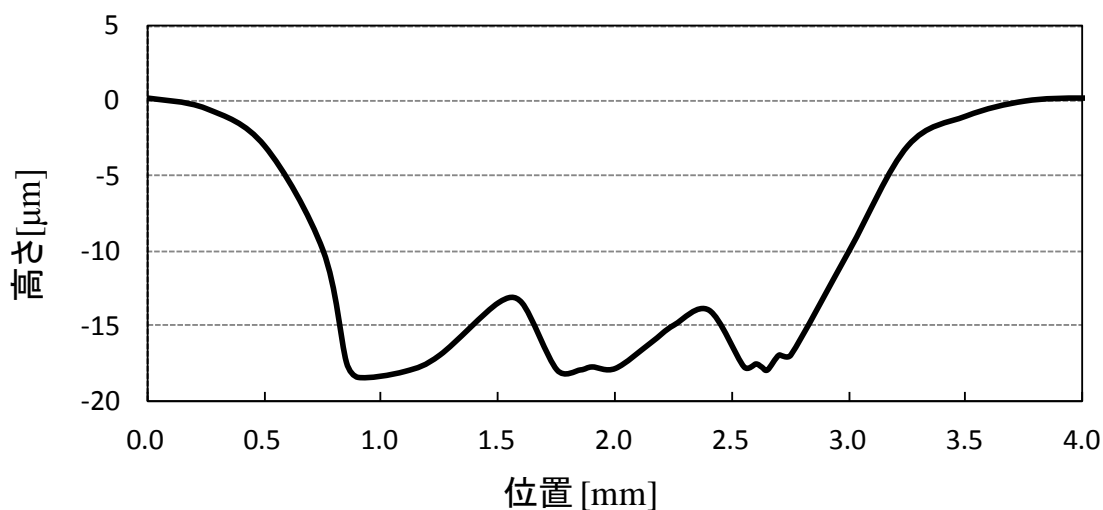
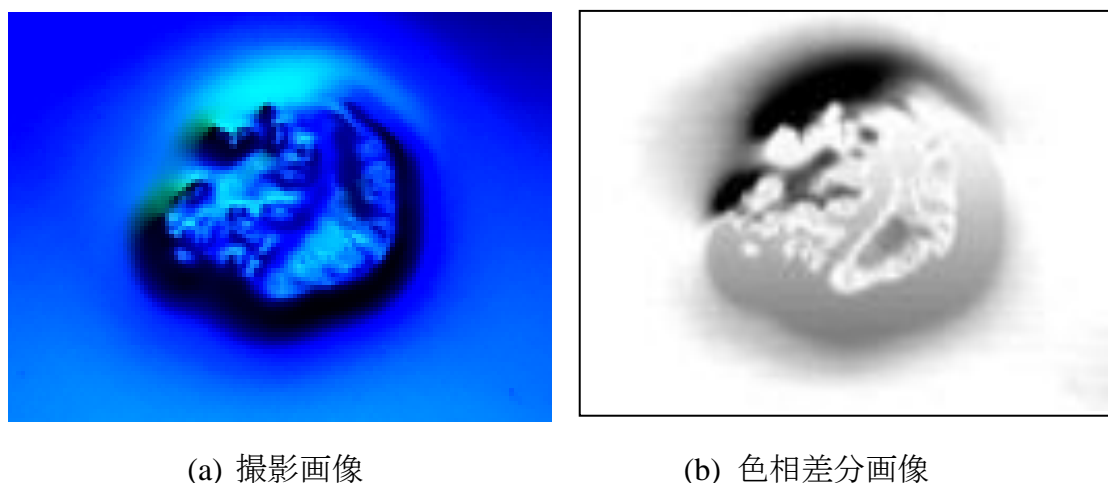


図 6-4 ハジキ不良の高さ断面



(a) 撮影画像

(b) 色相差分画像

図 6-5 ハンディユニットによる撮影画像（不良部拡大）と色相差分画像

次に、透明ガラス上の凹凸を評価した。ハンディ HOE 照明ユニットでの照明光は、接触面に対して 10[deg]程度の傾きを有しているため、透明ガラスの場合でも、ガラス表面での鏡面反射成分が存在しており、その反射光をカメラで観察することができる。対象としたガラスの接触式測定機による高さ断面を図 6-6 に示す。ガラス作成時の粘度が高く、表面に 1~2[μm]程度の凹凸が多数存在している。高さ断面から推測される表面法線方向の変化量は 0.5[deg]程度であった。ハンディ HOE 照明ユニットによる撮影画像、及び色相差分画像が図 6-7 であり、透明ガラス上の 1~2[μm]程度の凹凸も認識することが可能である。

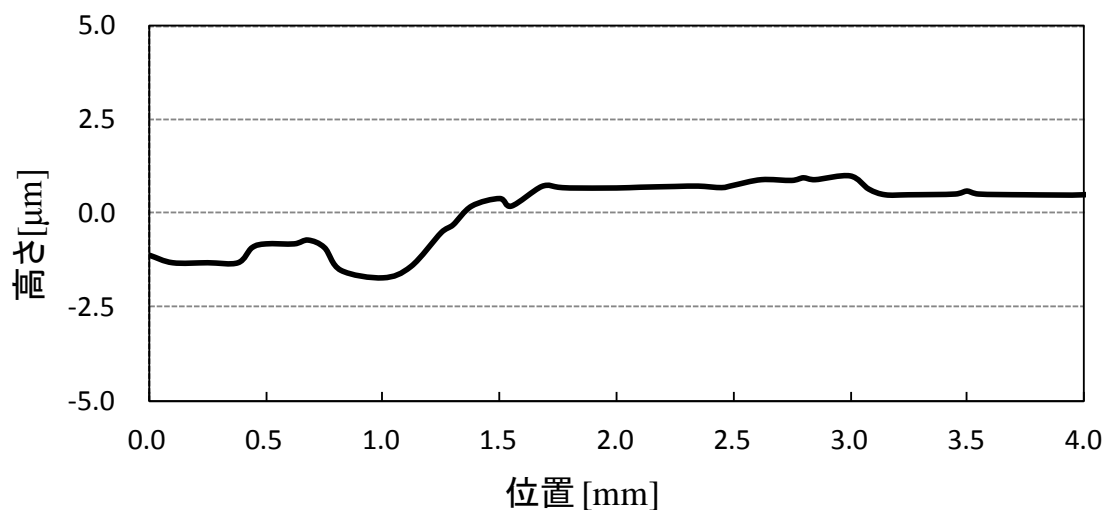
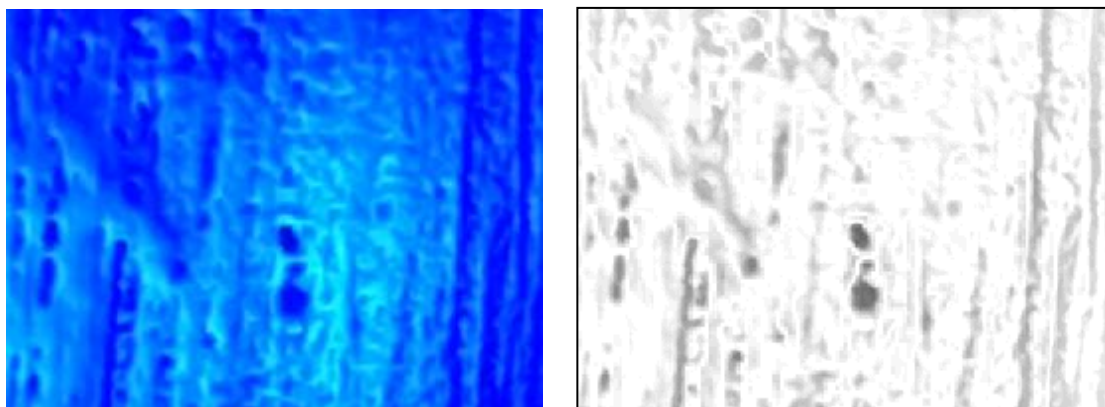


図 6-6 ガラスの凹凸の高さ断面



(a) 撮影画像

(b) 色相差分画像

図 6-7 ハンディユニットによる撮影画像（不良部拡大）と色相差分画像

6.2 均一 HOE 照明ユニット

次に、回折光が一点に集光するように作成された HOE を用いる。図 6-8 のように、回折光の集光位置をカメラのレンズの焦点面と一致させることにより、対象が平面であれば撮影領域全体が均一な色相となる画像を撮影することが可能である。本研究では、このような照明を均一 HOE 照明ユニットと呼ぶことにする。均一 HOE 照明ユニットでは、理想的には特定の色相以外は不良部分とみなせすことができる。

0.8[mm]程度のブツ不良を対象に、均一 HOE 照明ユニットを用いて撮影した画像を図 6-9(a)に示す。均一 HOE 照明ユニットでは、20[mm]の視野範囲全体が緑色一色で撮影されている。一方で、ハンディ型 HOE 照明ユニットの場合(図 6-9(b))は、プリズム型 HOE を使用しており、照射エリアが全て青色となるよう照射範囲を限定していた(6.1 節で用いた画像は不良部分の拡大画像を使用した)。ハンディ型 HOE 照明ユニットでの照射範囲外では、第 4 章や第 5 章の画像のように、緑や赤に色相が変化しており、均一 HOE 照明ユニットとは明確に異なる。

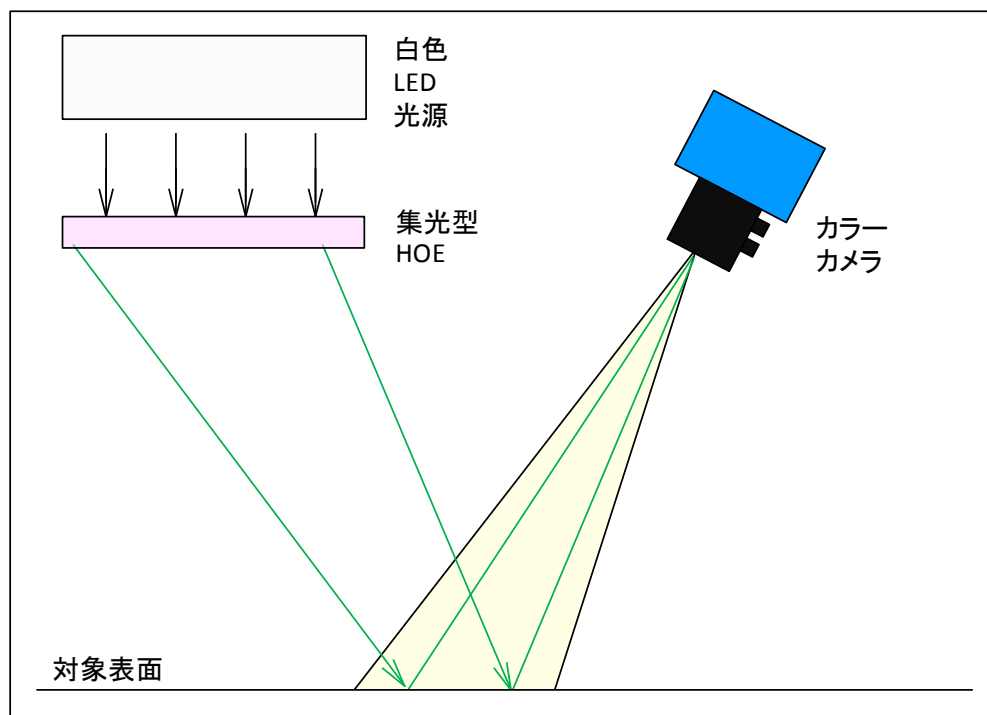
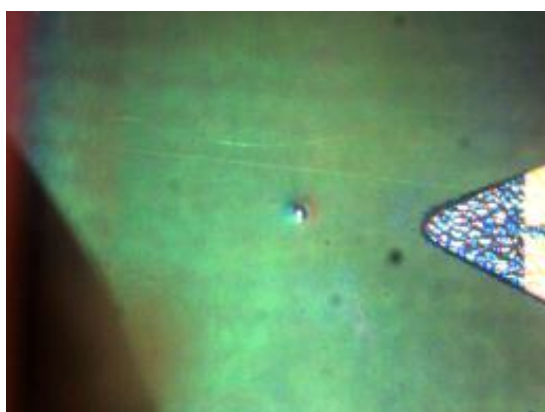


図 6-8 均一 HOE 照明ユニットの光学系

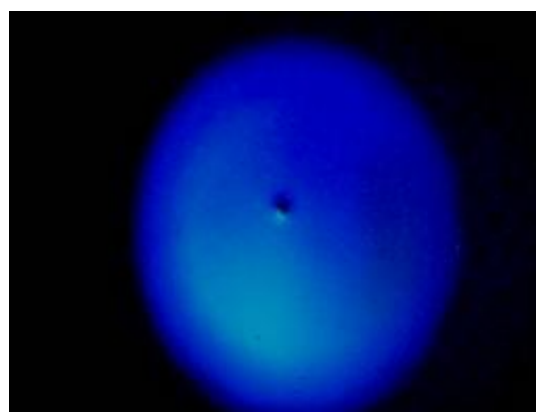
図 6-9 の撮影画像に対し，不良部分の拡大画像と色相差分画像を図 6-10 に示す．目視でも赤，青の部分が確認でき，色相変化量が大きいことがわかる．

今回の試作は 40[mm]角の HOE を用いて 20[mm]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 300[mm]角の HOE が作成可能であり，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．

回折光の集光位置にラインセンサや単一の光センサ，または分光器を設置することにより，回折光の照射範囲全体に対して不良の有無を検査するシステムが構築できると考える．また，透過物体に対しても応用可能であるため，高速に大量生産される透明フィルムの膜厚や特性検査に応用可能である考える．



(a) 均一 HOE 照明ユニット

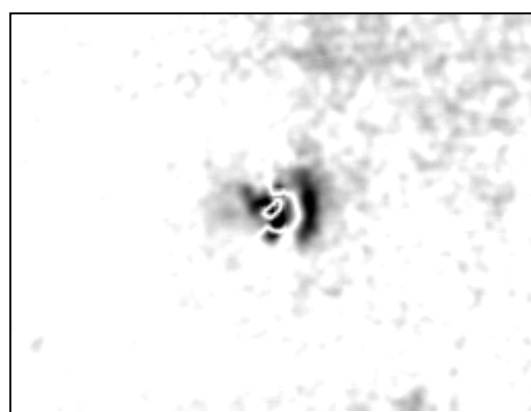


(b) ハンディ HOE 照明ユニット

図 6-9 均一 HOE 照明ユニットとハンディ HOE 照明ユニットの違い



(a) 撮影画像



(b) 色相差分画像

図 6-10 均一 HOE 照明ユニットでの撮影画像（不良部拡大）と色相差分画像

6.3 同軸 HOE 照明ユニット

集光型 HOE を用いることで、スポット LED から照射される光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、スポット LED からの光を 1 枚目の HOE で回折させることにより生成される平行光を 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。本研究ではこの照明を同軸 HOE 照明ユニットと呼ぶ。模式図は図 6-8 であり、撮影例を図 6-9 に、不良部の拡大画像と色相差分の結果を図 6-10 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、時間的に照度パターンが変化するアクティブ照明の機能を持たせることで、光沢表面の三次元計測等への応用も期待される。

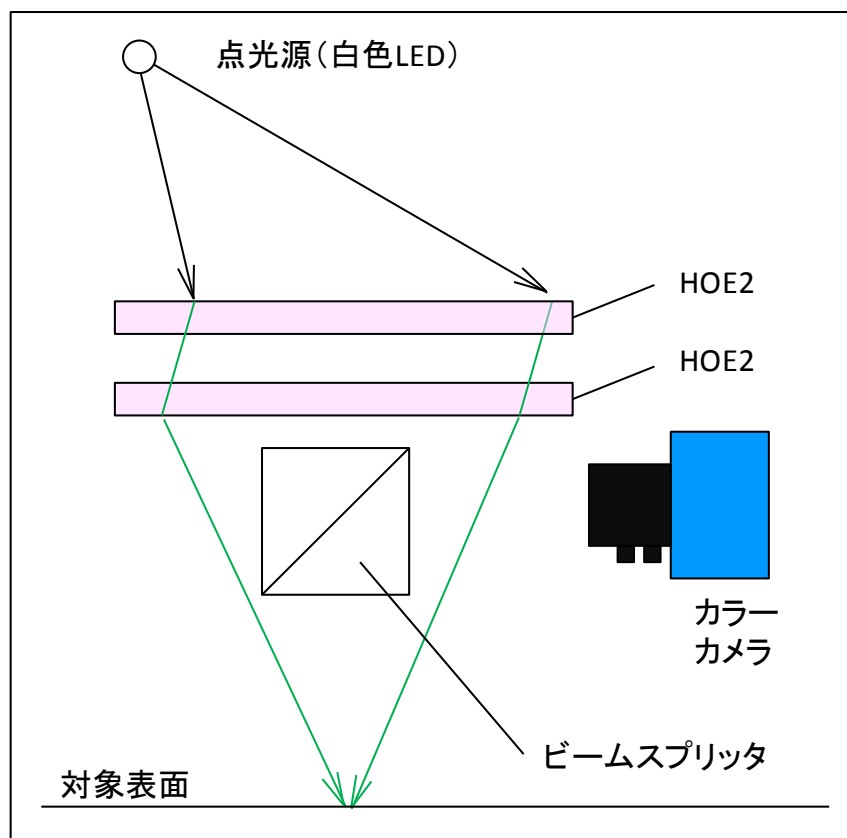


図 6-8 同軸 HOE 照明ユニットの光学系

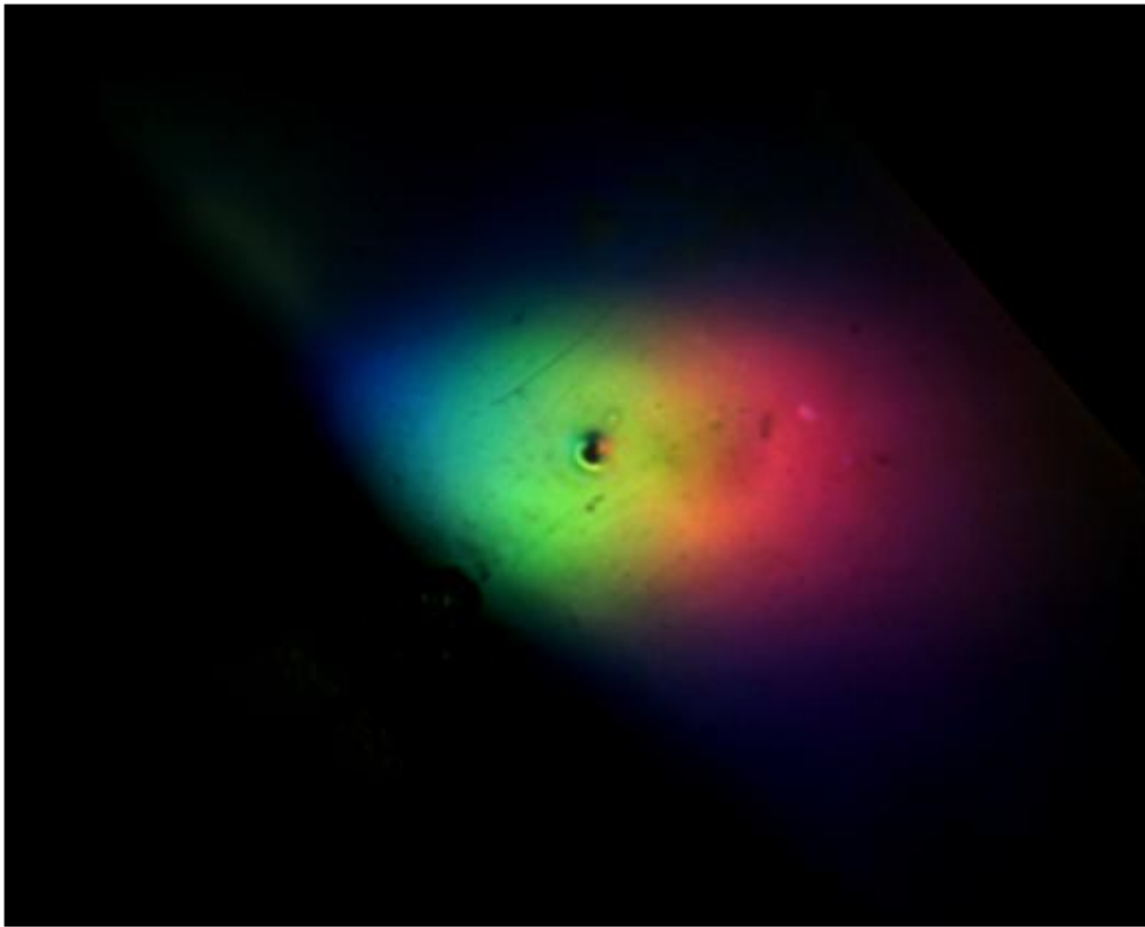
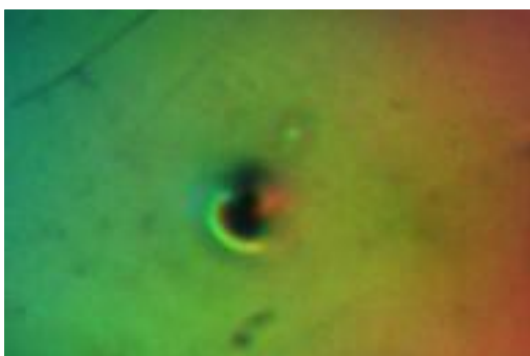
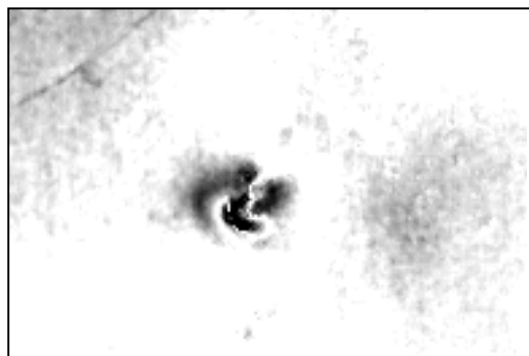


図 6-9 同軸 HOE 照明ユニットによる撮影画像



(a) 撮影画像



(b) 色相差分画像

図 6-10 同軸 HOE 照明ユニットでの撮影画像（不良部拡大）と色相差分画像

表6.5 不良検出性能

光源	視野 [mm]	照明範囲 [mm]	色相変化 [deg/mm]	色相誤差 [deg]	不良部で の色相差 [deg]
HOE照明 (5章)	30	20	18.2	1.8	133
ハンディHOE 照明ユニット	18	10	6.2	1.5	21
均一型HOE 照明ユニット	16	16	2.5	11.3	100
同軸型HOE 照明ユニット	16	4	47.8	4.6	70

6.4 まとめ

本章では、鏡面反射成分の強い光沢表面を持つ対象の検査に適した HOE を用いて、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等の実際のサンプルに対する検討を行った。撮影画像・色相差分画像例も示し、ブツ不良以外への有効性や応用システムの展望を示した。この照明システムの LED 照明の前面に薄く軽量の HOE を挿入することで構築が可能であることも実用上優位である。

我々の構築したユニットの光学特性を表 6-1 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）、0.8[mm]サイズのブツ不良での色相差分の代表値となっている。5 章及び本章で提示した処理方法を基に、実際の不良に対応した画像処理の検討を進めることで、より微小な不良をロバー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。

第7章 結論

本研究では、光沢表面を有する部品の外観検査を対象として、新しい照明を用いた外観検査方式を提案した。提案法で用いる照明は照明内部にホログラフィック光学素子 (Holographic Optical Element, HOE) を搭載する (HOE 照明と呼ぶ)。この HOE 照明では、HOE による回折光を照明光とすることにより、従来のマシンビジョン用照明には存在しない特徴が実現される。HOE 照明の持つ特徴を利用することにより、1 枚の撮影画像中の「色の変化」から光沢表面の検査を行う、全く新しい検査方式が実現した。

第 2 章では、表面での散乱反射／直接反射の違いについて述べた上で、表面検査システムで用いられる照明について、拡散反射が主となる表面を持つ対象と鏡面反射が主となる表面 (光沢表面) を持つ対象に分けながら説明を行った。スポット LED 照明、面発光照明、プロジェクタ、共焦点、デジタルホログラフィ、大面積パターン照明に対し、光の表現を統一した上で説明を行うことにより、それぞれの照明の持つ特徴を明確にした。また、提案法で用いる HOE 照明についても同様の検討を行い、HOE 照明の場合、入射光線の方向が光の波長の関数となる、という他の照明にはない特徴を有していることを述べた。

第 3 章では、提案法で使用する照明の重要構成要素である HOE について説明を行った。まず、回折の基本原理について説明し、色分散の指標である Abbe 数について、回折型素子での数値を導出した。さらに、屈折型素子との比較を行い、回折型素子の色分散は 10 倍程度と非常に大きく、屈折型とは逆方向の色分散であることを確認した。大きな色分散は、回折光の角度が微小に変化したとき、その波長が大きくことなることを示している。これは、光沢表面上の不良による微小な角度変化を色により検出する、という提案法にとって、回折光学素子が非常に好ましい特性を有することを意味する。続いて、ホログラフィの原理と種類、及び回折効率や角度及び波長選択性等の重要な指標について述べた。光源に指向性の高くない LED を用い、また、色分散を活用する提案法においては、回折効率と角度選択性が高く、かつ波長選択性が低い透過型位相変調体積ホログラムが最も適していることを示した。さらに、本研究にて開発した HOE プリンタについて述べた。ホログラフィは光の干渉縞を記録するた

め、作成時の振動は HOE の品質に重大な影響を及ぼすことが懸念される。しかし、開発した HOE プリントは、コリニア方式と Q スイッチパルスレーザーを用い、光学系を最適化することにより、この課題を克服し、振動がある条件化でも HOE の作成が可能である。この結果、光学ヘッド移動速度 240[mm/s] で回折効率 74[%]の HOE が作成可能であること確認した。他の研究と比較し、この HOE 作成速度は従来の HOE プリントに比べ 10 倍以上高速であることを確認した。

第 4 章では、HOE の持つ「波長に応じて回折角度の方向が変化する」という特性を活用した、光沢表面の法線方向の新しい角度測定方式を提案した。平面ミラーを回転させることにより、色相と角度との関係性を評価できることを示し、近似式を導入して法線角度を実験的に算出した。平面ミラーに対する実験の結果、角度-2.0~2.0[deg]の範囲において、ゴニオ回転設定値と平均角度とのずれの標準偏差は 0.010[deg]、断面全体での角度の標準偏差 0.085[deg]で測定可能であることを確認した。また、凹面ミラーを対象とした実験により、形状が曲面の場合でも平均二乗誤差 0.08[deg]で測定可能であることを示した。これら実験から提案法により 1[deg]オーダーの法線方向変化を有する外観不良の検査に十分な性能を有することを確認した。また、実験で観察した反射光は平面波、及び収束する球面波であり、そのどちらの場合でも提案法による法線方向の測定が可能であることから、凸面や変曲点を有する一般の形状に対しても提案法は妥当性を有すると考えられる。

また、分光器を用いて光源の波長特性と実際の回折光の波長分布について調査し、回折光は sinc 関数の二乗で近似できる波長の広がりを有することを確認した。また、センサ感度と色相の関係性を調べることにより、実際の撮影画像から計算される色相と回折による照明光の光線角度との関係性を示すモデル式を提案し、回折波長の広がりが測定に有利に働くことを示した。

第 5 章では、HOE 照明を用いた光沢表面に対する外観検査システムについて延べた。対象は光沢表面を有するアクリル板上に存在する幅 1[mm]以下のブツ不良とし、複数の照明方式による撮影画像と HOE 照明を用いた方式での撮影画像の比較を行った。スポット LED 照明、面発光照明、プロジェクタによる投光はいずれも光沢表面の検査には不適であることを確認した。また、光沢表面に適した照明手法の一つである大面積パターン照明と HOE 照明の比較も行った。幅 0.8[mm]のブツ不良に対して S/N 比を計算し、矩形白黒パターンを用いた大面積パターン照明は 31.3[dB]、正弦波カラーパターンを用いた大面積パタ

ーン照明は 30.3[dB]、HOE 照明は 37.6[dB]という結果を得られた。これらの結果は、検査した不良に対して、HOE 照明が最も良好な不良検出性能を有することを示している。また、より小さいサイズとなる幅 0.4[mm]のブツ不良に対しても同様に評価した。その結果、矩形白黒パターンでは 18.1[dB]、正弦波カラーパターンでは 22.2[dB]、HOE 照明 26.2[dB]であり、この不良についても HOE 照明が最もよい性能であることを確認した。カラーパターンの変化量と不良のサイズとの関係を考慮し、より細かいカラーパターンも投影したが、照明面でのピントぼけの影響により、撮影画像では RGB が混色し、検査することはできなかった。一方、HOE 照明の場合は、異なる波長の光が受光された場合も、色相への影響は少なく、むしろ色相と入射光の方向との関係を線形性にする効果がある。そのため、HOE 照明は対象にピントを合わせた検査が可能であり、この点においても提案法は微小な不良の検査に適していると考えられる。更に、撮影画像中の不良の位置に対する検討を行い、正常部分の色相に依らず検査可能であることを確認した。本章で確認した HOE 照明の性能、及び特性は、従来裸眼目視で検査されている、量産製造ラインでの部品に対する検査に適していることを示唆していると考えられる。

第 6 章ではコンパクトなハンディ HOE 照明ユニットを構築し、樹脂表面、ガラス表面、塗装面等における実際の不良に対する測定結果を示した。また、均一 HOE 照明ユニットや同軸 HOE 照明ユニット等、光学レイアウトを変更した構成例について述べ、このような光学レイアウトの変更により、棒状や加工端等の検査にも応用できる可能性を示した。

以上のように、本研究で提案する HOE 照明を用いた外観検査方式は、光沢表面上の不良を 1 枚の画像のみを用いて検査可能である。未だ光沢表面上の不良検査へのマシンビジョンシステムの適用は少なく、本研究で開発した技術を発展させることにより、実際の部品製造ラインでのインライン検査でのマシンビジョンシステムの更なる活用に繋がるものと考えられる。

また、第 3 章で示した HOE 作成技術は、用途に合わせてカスタマイズされたホログラムの量産に繋がる技術であると考えられる。現時点では限られた環境で限られた研究者により少数作成される専門性の高いホログラムを、広く一般に認知され、現在より幅の広い分野に応用されていくことを期待したい。

一方、第 4 章で用いた色相と角度との近似式では色相が 30[deg]以下、および 210[deg]以上の領域では測定誤差が大きい。角度測定可能な範囲を広げ、また様々な波長特性を有する光源やセンサで適用するため、非線形領域への対応が

望まれる。また，本研究で用いた光学系では，角度測定が可能な範囲は 3[deg] となっているが，HOE の青領域と赤領域での回折角度の差をより広くすることや，高次回折光を活用することにより，測定可能な範囲を拡張することができる。今後，この目的に合致する HOE を作成し，測定可能な対象を拡げたい。

謝辞

本研究を行うにあたり、終始懇切丁寧なご指導を頂きました名古屋工業大学 梅崎太造教授、本谷秀堅教授、佐藤淳教授に謹んで感謝申し上げます。

また、本研究を行うにあたりご協力いただいた、田口亮助教、博士後期課程の鷺見典克くんをはじめとした梅崎・田口研究室関係者各氏、ならびに中部大学 保黒政大教授、葛谷幹夫教授、服部公央亮講師に深く感謝します。

また、本研究における重要技術であるホログラフィ技術に関し、懇切丁寧に技術指導をいただき、また沼津での研究活動を支援していただいた合同会社 3Dragons 堀米秀嘉氏、株式会社エガリム 加瀬澤寿宏氏、山本しのぶ氏、合同会社 Shape in Space 堀米由美氏、尾間彩子氏に心より感謝いたします。

また、私が名古屋工業大学大学院博士後期課程に進むことを快諾してくださいました、株式会社マクスエンジニアリング 代表取締役社長 水野敬三氏、ならびに本研究に対する十分な研究時間を確保いただくよう業務上の協力や研究の助言をいただいた、株式会社マクスエンジニアリング 小池一郎常務取締役、技術部開発室 柴田進室長、中川勝統氏、林真司氏に厚く御礼申し上げます。

本研究の完遂までには紆余曲折もあり、進捗が芳しくない時期も多く、ここで挙げた皆様のご助力がなければここまで辿り着くことは適いませんでした。重ねて御礼申し上げます。

本研究の一部は、公益財団法人 堀科学芸術振興財団、及び公益財団法人 クリタ水・環境科学振興財団の研究助成、ならびに公益財団法人 科学技術交流財団における「知の拠点あいち 重点研究プロジェクト」からの援助を受けたものであり、関係各位に深謝いたします。

最後に、研究の進捗が芳しくなく、精神的な負担を感じていたときも、陰に日向に支えてくれた妻 真紀子に感謝の言葉を伝えます。

参照文献

- [1] 株式会社富士経済 大阪マーケティング本部 第4部, “2017 画像処理システム市場の現状と将来展望”, 株式会社富士経済, 2017.
- [2] 吉澤徹, “最新光三次元計測”, 朝倉書店, 2006.
- [3] 塚原博之, “生産分野における3次元計測技術”, *FUJITSU*, vol. 56, no. 6, pp. 565-572, 2005.
- [4] 肥塚哲男, “FA用マシンビジョンにおけるパターン計測と実応用”, *計測と制御*, vol. 53, no. 7, pp. 557-562, 2005.
- [5] 渡邊裕之, “自動車用部材向け外観検査技術”, *電気製鋼*, vol. 85, no. 2, pp. 139-148, 2014.
- [6] 西郷知泰, 田口亮, 梅崎太造, “インライン運用に向けた高精度ばね計測手法の開発”, *第20回画像センシングシンポジウム(SSII2014)*, IS3-29, 2014.
- [7] 長門毅, 肥塚哲男, “生産ラインにおける画像処理プログラムの自動生成技術”, *FUJITSU*, vol. 66, no. 5, pp. 27-33, 2015.
- [8] 原田耕太, “画像処理による3次元寸法測定装置の開発”, *KYB技報*, vol. 56, no. 4, pp. 30-33, 2018.
- [9] 松村繁, 仲道朋弘, “株式会社三次元メディア～3次元認識技術によりロボットビジョンの実用化を目指す取組み～”, *映像情報メディア学会誌*, vol. 64, no. 8, pp. 1240-1242, 2010.
- [10] 佐藤優也, 原田研介, 酒田信親, 万偉偉, ラミレス イクシエル, “バラ積みされた難識別対象物に対する2段階ピッキング手法”, *日本機械学会論文集*, vol. 84, no. 861, pp. 17-00546, 2018.
- [11] 西郷知泰, 田口亮, 梅崎太造, “高精度バラ積みピッキングロボットシステム”, *第20回画像センシングシンポジウム(SSII2014)*, DS1-05, 2014.
- [12] ASIA GATEWAY, “釜山日報がトヨタ自動車九州工場を特集で報道”, <http://japan.busan.com/jp/news/sub1.asp?num=99>, (2012-08-29掲載), ASIA

GATEWAY, 2018.11.8 アクセス.

- [13] J. C. Martinez-Anton, H. Canabal, A. Quiroga, E. Bernabeu, M. Alvaro, V. C. Testillano, “Enhancement of surface inspection by Moire interferometry using flexible reference gratings”, *Optic Express*, vo. 8, no. 12, pp. 649-654, 2001.
- [14] D. -I. Loferer, “Automatic painted surface inspection and defect detection”, *SENSOR+TEST Conference 2011, Proceedings SENSOR 2011*, pp. 871-873, 2011.
- [15] 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*, vol. 64, no. 7 pp. 22-25, 2013.
- [16] W. Zhao, L. Li, “The optical surface defect inspection by fringe reflection”, *7th International Symposium on Advanced Optical Manufacturing and Testing Technologies: Optical Test and Measurement Technology and Equipment*, Proceedings Volume 9282, 2014.
- [17] A. Manallah, M. Bouafia, “Detection and measurement of surface defects by fringe projection technique”, *The International Society for Optical Engineering*, Proceedings Volume 9442, 2015.
- [18] 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*, vol. 27, no. 11, pp. 1-7, 2016.
- [19] 脇迫仁, 森勇貴, “光沢のあるプラスチック部品の外観検査”, *産業応用工学会論文誌*, vol. 4, no. 2, pp. 45-49, 2016.
- [20] R. L. Powell, K. A. Stetson, “Interferometric Vibration Analysis by Wavefront Reconstruction”, *Journal of the Optical Society of America*, vol. 55, no. 12, pp. 1593-1598, 1965.
- [21] 辻内順平, 武谷直也, 松田浄史, “ホログラフィによる変形の測定”, *応用物理*, vol. 37, no. 9, pp. 877-882, 1968.
- [22] 川澄博通, 田中一夫, “ホログラフィ干渉法によるボルト締結体の変形測定”, *精密機械*, vol. 38, no. 453, pp. 850-856, 1972.
- [23] 谷村吉久, “ピッチ測定へのホログラフィ干渉の応用”, *レーザー研究*, vol. 2, no. 1, pp. 37-39, 1974.
- [24] 柏木孝夫, 黒崎晏夫, “ホログラフィ干渉法による物質移動の可視化”, *伝熱研究*, vol. 23 no. 88, pp. 18-27, 1984.

- [25] R. S. Longhurst, “Geometrical and physical optics (3rd edition)”, *Harlow Longman Scientific & Technical*, 1990.
- [26] M. Born, E. Wolf, “Principles of Optics (7th edition)”, *Cambridge University Press*, 1999.
- [27] B. T. Phong, “Illumination for computer generated pictures”, *Communications of the ACM*, vol. 18, no. 6, pp. 311-317, 1975.
- [28] F. L. Pedrotti, L. M. Pedrotti, L. S. Pedrotti, “Introduction to Optics(3rd edition)”, *Cambridge University Press*, 2006.
- [29] DatasheetsPDF.com, “NVSW119CT (Nichia)”[Online], <https://datasheetspdf.com/pdf-file/964991/NICHIA/NVSW119CT/1>, 2018 11 8 アクセス.
- [30] Linkman株式会社, “【LA504W3CA2C02】LED(5mm・白・超高輝度・3.2V・20mA・18000mcd)”[Online], <https://www.linkman.jp/data/LA504W3AC2C02.pdf>, 2018 11 8 アクセス.
- [31] S. K. Nayar, Y. Nakagawa, “Shape from focus”, *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, vol. 16, no. 8, pp. 824-831, 1994.
- [32] 柴田進, 西郷知泰, 林真司, 田口亮, 梅崎太造, “区分的焦点画像による合焦式高速三次元計測”, *電気学会論文誌C*, vol. 130, no. 7, pp. 1192-1197, 2010.
- [33] 井口征士, 佐藤宏介, “三次元画像計測”, *昭晃堂*, 1990.
- [34] 高田翔平, 坂上文彦, 佐藤淳, “マルチプロジェクタによる3次元形状強調”, *画像の認識・理解シンポジウム2012(MIRU2012)*, IS1-03, 2012.
- [35] 坂上文彦, 山口哲矢, 佐藤淳, “プロジェクタ投影光の時間積分に基づく運動情報の映像化”, *研究報告デジタルコンテンツクリエーション(DCC)*, vol. 2016-DCC-14, no. 17, pp. -6, 2016.
- [36] M. Minsky, “Memoir on investigating the confocal scanning microscope”, *Scanning*, vol. 10, no. 4, pp. 128-138, 1988.
- [37] D. B. Hovis, H. Heuer, “The use of scanning confocal microscopy(LSSCM) in materials science”, *Journal of Microscopy*, vol. 240, no. 3, pp. 173-180, 2010.
- [38] G. Q. Xiao, T. R. Corle, G. S. Kino, “Real-time confocal scanning optical microscope”, *Applied Physics Letters*, vol. 53, no. 716, pp. 716-718, 1988.

- [39] 石原満宏, 佐々木博美, “非走査マルチビーム共焦点撮像系による高速三次元計測”, *精密工学会誌*, vol. 64, no. 7, pp. 1022-1028, 1998.
- [40] E. Hase, T. Minamikawa, T. Mizuno, S. Miyamoto, R. Ichikawa, Y.-D. Hsieh, K. Shibuya, K. Sato, Y. Nakajima, A. Asahara, K. Minoshima, Y. Mizutani, T. Iwata, H. Yamamoto, T. Yasui, “Scan-less confocal phase imaging based on dual-comb microscopy”, *Optica*, Vol. 5, No. 5, pp. 634-643, 2018.
- [41] M. A. Kronrod, N. S. Merzlyakov, L. P. Yaroslavskii, “Reconstruction of a Hologram with a Computer”, *Soviet Physics Thchnical Physics*, vol.17, pp. 333-334.
- [42] I. Yamaguchi, T. Zhang, “Phase-shifting digital holography”, *Optics Letters*, vol. 22, no. 16, pp. 1268-1270, 1997.
- [43] J.-C. Li, P. Picart, “Digital Holography”, *Wiley & Sonic Inc.*, , 2013.
- [44] Y. Awatsuji, “Parallel quasi-phase-shifting digital holography”, *Applied Physics Letters*, vol. 85, no. 6, pp. 1069-1071, 2004.
- [45] Yu Qiyue, 田口亮, 保黒政大, 堀米秀嘉, 梅崎太造, “ワンショット位相シフトデジタルホログラフィによる三次元計測装置の開発”, *精密工学会誌*, vol. 80, no. 4, pp. 375-381, 2014.
- [46] 鷺見典克, 服部公央亮, 田口亮, 保黒政大, 梅崎太造, 堀米秀嘉, “位相シフト法における位相信頼性評価手法”, *精密工学会誌*, vol. 82, no. 12, pp. 1078-1084, 2016.
- [47] M. B. Al-Quzweny, S. M. Hadi, A. I. Owaid, “Determining metal surface waviness parameters and height liquid surface wave by tracking reflected laser speckle”, *International Journal of Advanced Research in Engineering and Technology*, Vol. 7, No. 2, pp.69-77, 2016.
- [48] Y. M. Amir, B. Thornberg, “High Precision Laser Scanning of Metallic Surfaces”, *International Journal of Optics*, vol. 2017, article ID 4134205, pp. 1-13, 2017.
- [49] O. Kafri, “Nocoherent method for mapping phase objects”, *Optics Letters*, vol. 5, no. 12, pp. 555-557, 1981.
- [50] R. Ritter, “Contributioon to analysis of the reflection grating method”, *Optics and Lasers in Engineering*, vol. 4, no. 1, pp. 13-24, 1983.
- [51] 新井泰彦, 倉田忠雄, “しま走査干渉計の手法によるMoire Deflectometry”, *精密工学会誌*, vol. 54, no. 4, pp. 726-730, 1988.

- [52] S. S. Farahani, K. Madanipour, A. Koochian, “Nonscanning Moire deflectometry for measurement of nonlinear refractive index and absorption coefficient of liquids”, *Applied Optics*, vol. 56, no. 13, pp. 3634-3638, 2017.
- [53] M. C. Knauer, J. Kaminski, G. Hausler, “Phase measuring deflectometry: a new approach to measure specular free-form surfaces”, *Proceedings of the SPIE, Optical Metrology in Production Engineering*, Proceedings Vol. 5457, 2004.
- [54] 公益社団法人 応用物理学会 日本光学会 光設計研究グループ監修, “回折光学素子入門 増補改訂版”, オプトロニクス社, 2006.
- [55] 宮前博, “回折レンズ系の幾何光学的取り扱い”, *光学*, Vol. 27, No. 9, pp. 513-519, 1998.
- [56] 久保田敏弘, “新版 ホログラフィ入門 ー原理と実際ー”, 朝倉書店, 2010.
- [57] K. Matsushima, N. Sonobe, “Full-color digitized holography for large-scale holographic 3D imaging of physical and nonphysical objects”, *Applied Optics*, vol. 57, no. 1, pp. A-150-A156, 2018.
- [58] 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*, vol. 17, no. 4, pp. 220-227, 2004.
- [59] 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*, vol. 28, no. 2, pp.71-75, 1999.
- [60] 船橋信彦, 金城秀和, 青島賢一, 加藤大典, 麻生慎太郎, 久我淳, 町田賢司, 菊池宏, “電子ホログラフィ用スピン注入型空間光変調器の研究”, *映像情報メディア学会誌*, vol. 71, pp. J131-J136, 2017.
- [61] 稲垣義弘, “ホログラフィック光学素子を用いたウェアラブルディスプレイの光学設計”, *KONICA MINOLTA TECHNOLOGY REPORT*, vol. 13, pp. 123-127, 2016.
- [62] P. Saarikko, P. Kostamo, “Waveguide”(Patent), *US Patent and Trademark Office*, US9513480 B2, 2015.
- [63] W. R. Klein, B. D. Cook, “Unified approach to ultrasonic light diffraction”, *IEEE Transactions on Sonics and Ultrasonics*, Vol. 14, No. 3, pp. 123-34, 1967.
- [64] P. Hariharan著, 吉川弘, 羽倉弘之訳, “ホログラフィの原理”, オプトロニクス社, 2004.
- [65] W. F. Fagan ed., “Optical Security & Anticounterfeiting System”, *Proceedings*

of the SPIE, Proceedings Vol. 1210, 1990.

- [66] H. Kogelnik, “Coupled Wave Theory for Thick Hologram Gratings”, *Bell System Technical Journal*, Vol. 48, No. 9, pp. 2909-2947, 1969.
- [67] B.-R. David, “Understanding Diffraction in Volume Gratings and Holograms”, *Intech Open*, 2013.
- [68] 植田秀昭 著, 志村努 監修, “ホログラフィックメモリーのシステムと材料 《普及版》 (第3章 記録メディア技術, 2. ダイソー(株)のホログラム記録材料)”, シーエムシー出版, 2012.
- [69] M.-S. Weiser, F.-K. Bruder, T. Facke, D. Honel, D. Jurbergs, T. Rolle, “Self-processing, diffusion-based photopolymers for holographic applications”, *Macromolecular Symposia*, Vol. 296, No. 1, 2010.
- [70] H. J. Coufal, D. Psaltis, G. T. Sincerbox, “Holographic Data Storage”, *Springer-Verlag Berlin Heidelberg GmbH*, 2000.
- [71] A. V. Morozov, A. N. Putilin, S. S. Kopenkin, Y. P. Borodin, V. V. Druzhin, S. E. Dubynin, G. B. Dubynin, “3D holographic printer: Fast printing approach”, *Optics Express*, Vol. 22, No. 3, pp.2193-2206, 2014.
- [72] H. Horimai, X. Tan, J. Li, “Collinear Holography”, *Applied Optics*, Vol. 44, No. 13, pp. 2575-2579, 2005.
- [73] H. Horimai, X. Tan, “Collinear Holography / Principle and Applications”, *Journal of the Imaging Society of Japan*, Vol. 45, No. 3, pp.270-276, 2006.
- [74] K. Tanaka, M. Hara, K. Tokuyama, K. Hirooka, K. Ishioka, A. Fukumoto, K. Watanabe, “Improved performance in coaxial holographic data recording”, *Optics Express*, Vol. 15, no. 24, pp.16196-16209, 2007.
- [75] 堀米秀嘉, “コリニア方式ホログラムメモリーの最新動向とAPIMにおける取り組み”, *HODIC Circular*, Vol. 28, No. 3, 2008.
- [76] T. Nobukawa, T. Nomura, “Design of high-resolution and multilevel reference pattern for improvement of both light utilization efficiency and signal-to-noise ratio in coaxial holographic data storage”, *Applied Optics*, Vol. 53, no. 17, pp.3773-3781, 2014.
- [77] 伊藤善尚, 佐藤充, 奥山健久, 白戸琢也, “ホログラムプリンターの開発”, *PIONEER R&D*, 2014.
- [78] H. Horimai, “Holographic 3D-image Printer System with Collinear Optics”, *International Workshop on Holography and Related Technologies 2015*, IWH2015 Digest, Tu2-4, 2015.

- [79] 株式会社アルゴ, “センサ紹介IMX250”,
https://www.argocorp.com/cam/ImagingSource/sensor/Sony_IMX250.html,
2018. 7. 30 アクセス.

研究業績一覧

学術論文（査読あり） 主：2，副：0

- [1] **西郷知泰**, 柴田進, 堀米秀嘉, 服部公央亮, 田口亮, 梅崎太造, “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”, *精密工学会誌*, vol. 83, no.12, pp.1131-1138, 2017.
- [2] **西郷知泰**, 服部公央亮, 堀米秀嘉, 鷺見典克, 保黒政大, 田口亮, 梅崎太造, “ホログラフィック光学素子を用いた光沢物体の表面法線方向の角度測定”, *精密工学会誌* (to be published) .

国際会議（査読あり） 主：4，副：1

- [3] **Tomoyasu Saigo**, Hideyoshi Horimai, Ryo Taguchi, Taizo Umezaki, “Development of Ultra High Speed Holographic Printer System for Photopolymer”, *International Workshop on Photonics Polymer for Innovation(IWPPI)*, P-24, 2016.
- [4] **Tomoyasu Saigo**, Hideyoshi Horimai, Ryo Taguchi, Taizo Umezaki, “Ultra-high-speed holographic printer system for the photopolymer and evaluation of fabricated HOE’s characteristics”, *OSJ-OSA Joint Symposia*, 30pOD6, 2016.
- [5] **Tomoyasu Saigo**, Toshihiro Kasezawa, Hideyoshi Horimai, Ryo Taguchi, Taizo Umezaki, “Ultra High Speed Printing of Large Size Holographic Optical Elements for Solar Power Generation Window Module”, *International Workshop on Holography and Related Technologies 2016(IWH2016)*, pp.178-179, 2016.
- [6] Toshihiro Kasezawa, Hideyoshi Horimai, Hiroshi Tabuchi, **Tomoyasu Saigo**, Tsutomu Shimura, “Wide wavelength range of Holographic Window for Solar Power Generation ~ Holo-Window II ~”, *International Workshop on Holography and Related Technologies 2016(IWH2016)*, pp.182-183, 2016.

- [7] **Tomoyasu Saigo**, Susumu Shibata, Koosuke Hattori, Hideyoshi Horimai, Taizo Umezaki, “Holographic Optical Elements in Machine Vision Lighting”, *International Workshop on Holography and Related Technologies 2017 (IWH2017)*, 22p3, 2017.

シンポジウム・研究会（査読あり）主：7，副：1

- [8] **西郷知泰**, 田口亮, 梅崎太造, “湾曲した投影対象に対し歪み除去を行うプロジェクト投影システム”, *第20回画像センシングシンポジウム (SSII2014)*, IS2-39, 2014.
- [9] **西郷知泰**, 田口亮, 梅崎太造, “インライン運用に向けた高精度ばね計測手法の開発”, *第20回画像センシングシンポジウム(SSII2014)*, IS3-29, 2014.
- [10] **西郷知泰**, 田口亮, 梅崎太造, “高精度バラ積みピッキングロボットシステム”, *第20回画像センシングシンポジウム(SSII2014)*, DS1-05, 2014.
- [11] 田口亮, 井上航, **西郷知泰**, 保黒政大, 梅崎太造, 今井嘉之, 野田新見, “高密度配線組立支援のための電線番号照合アルゴリズムの開発”, *第17回画像の認識・理解シンポジウム(MIRU2014)*, DS2-5, 2014.
- [12] **西郷知泰**, 田口亮, 服部公央亮, 保黒政大, 梅崎太造, “2 レーザーを用いた高精度全周三次元ばね計測”, *第13回情報科学技術フォーラム (FIT2014)*, H-037, 2014.
- [13] **西郷知泰**, 堀米秀嘉, 田口亮, 梅崎太造, “分離可動型コリニア光学ヘッドによる高速ホログラフィックプリンタの開発”, *映情学技報*, Vol.40, No. 10, 3DIT2016-11, pp.5-8, 2016.
- [14] **西郷知泰**, 堀米秀嘉, 田口亮, 梅崎太造, “ホログラムシートレンズによる空中位置推定”, *第22回画像センシングシンポジウム(SSII2016)*, IS3-04, 2016.
- [15] **西郷知泰**, 柴田進, 堀米秀嘉, 服部公央亮, 田口亮, 梅崎太造, “ホログラフィック回折光学素子による反射面検査用RGB照明の開発”, *ビジョン技術の実利用ワークショップ (ViEW2016)*, OS6-H4(IS2-7), 2016.

口頭発表（査読あり）主：2，副：2

- [16] **西郷知泰**, 服部公央亮, 伊佐治知明, 山田雅雄, Andrés D. Maturana, 田口亮, 堀米秀嘉, 梅崎太造, “デジタルホログラフィ 3次元顕微鏡を活用した藻類画像情報処理システムの水質管理への適用”, 平成28年度全国会議 (水道研究発表会), 8-53, 2016.
- [17] Andres Daniel Maturana, 中川勝統, **西郷知泰**, 堀米秀嘉, 梅崎太造, “非侵襲性 3次元デジタルホログラフィ顕微鏡を用いた生細胞の直接観察”, 第39回日本分子生物学会年会, 2PS10-6(3P0899), 2016.
- [18] Andres Daniel Maturana, 中川勝統, **西郷知泰**, 堀米秀嘉, 梅崎太造, “Label-free 3D observation of living cells using digital holography microscopy”, 第94回日本生理学会大会, 2P-165, 2017.
- [19] **西郷知泰**, 服部公央亮, 伊佐治知明, 山田雅雄, Andres Daniel Maturana, 田口亮, 堀米秀嘉, 梅崎太造, “デジタルホログラフィ 3次元顕微鏡と画像解析技術を活用した水道生物の定量評価”, 平成30年度全国会議 (水道研究発表会), 8-26, 2018.

表彰

- [20] 平成29年度 名古屋工業大学 副学長表彰【学術部門】 受賞

採択奨励研究費

- [21] 堀科学芸術振興財団 2014年度 研究助成 一般の部 100万円
- [22] クリタ水・環境科学振興財団 2016年度 国内研究助成 100万円