

低コヒーレンスデジタルホログラフィを用いた マルチカラー3次元形状計測機構に関する研究

Multi Spectrum Tree-Dimensional Shape Measurement by Low Coherence Digital Holography

研究代表者 香川大学創造工学部 助教 森 裕

共同研究者 香川大学創造工学部 教授 佛圓哲朗

Yutaka Mori and Tetsuro Butsuen

A person can recognize various material information, such as shape, texture, and color, with very high precision by five senses. In human centered product design based on these characteristics, it is important to simultaneously measure non-destructive, non-contact, non-invasively parameters of multiple material information, from product planning and design stage to manufacturing and inspection stage. Low coherence digital holography is one way to solve this problem. In this research, we are working on achieving full-color measurement of object three-dimensional shape, improvement of measuring precision, high speed and high resolution.

要旨

ヒューマンセンタード・プロダクトデザインにおいて、製品の企画・設計段階から製作・検査段階におけるまで、複数の材料情報のパラメータを非破壊・非接触・非侵襲に同時計測する技術が重要である。低コヒーレンスデジタルホログラフィはこれを解決するひとつの手法と考える。本研究では、低コヒーレンスデジタルホログラフィによる多種多様なパラメータ同時計測の実現を目指し、物体3次元形状計測のフルカラー化と、計測精度の向上および高速・高解像度化を目的とした新たな位相シフト解析法の開発を達成した。

1. はじめに

人は五感により、様々な材料情報（形状、質感、色調など）を非常に高精度に認識することができる。この特性に基づくヒューマンセンタード・プロダクトデザイン^(1,2)において、製品の企画・設計段階から製作・検査段階におけるまで、複数の材料情報のパラメータを非破壊・非接触・非侵襲に同時計測する技術が重要となる。より多くの情報を一度に記録できる検査技術として、低コヒーレンスデジタルホログラフィは、この課題を解決する一つの方法と考えられる^(3,4)。

最近では2波長低コヒーレンスデジタルホログラフィを用いた散乱体内部構造の検出手法⁽⁵⁾やその顕微鏡応用⁽⁶⁾などが提案されている。2波長法は1度の露光で記録できる物体の奥行き情報を拡大するた

めの解析方法である。通常、低コヒーレンスデジタルホログラム1枚からは物体の奥行き情報は光源のコヒーレンス長しか記録されない。いずれにしても、国内外ともに低コヒーレンスデジタルホログラフィ分野では物体内部構造の検査技術について主として単一露光で記録可能な奥行き情報の拡大に関する研究がなされており、多種多様なパラメータの同時計測を目的とした研究は進んでいない。

本研究では、多種多様なパラメータの同時計測を先進的に進めていくために、これまで実現されていないLCDHによるスペクトル反射光強度特性、物体3次元形状計測の同時計測技術の確立を目的とする。その方策として、まず物体形状計測とスペクトル反射率分布の同時計測達成と計測の高解像度化および高速化のための新しいシングルショット位相シフトデジタルホログラフィの開発に取り組んだので、その成果について報告する。

2. 低コヒーレンスデジタルホログラフィによる3次元形状-スペクトル特性同時計測

まず、研究の主テーマである物体形状とスペクトル反射特性の同時計測原理、計測機構ならびに実施した確認実験について述べる。

2.1 計測原理

低コヒーレンスホログラフィでは物体光と参照光の光路差0位置付近の非常に狭い範囲でのみ干渉縞が得られる。図1に計測原理の概念図を示す。図1

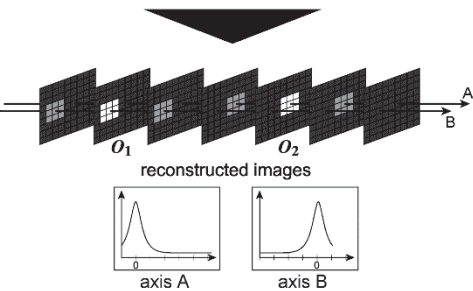
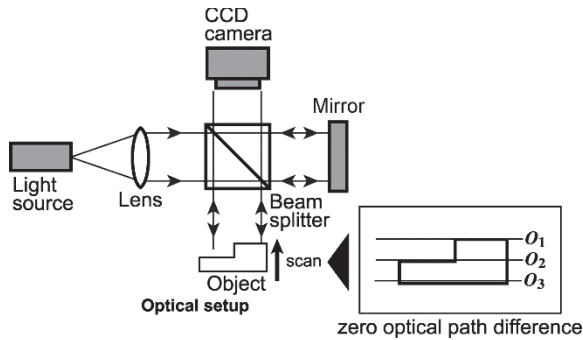


図1 3次元形状-スペクトル特性同時計測機構

に示すように、物体（あるいは参照ミラー）をスキャンした場合、物体の形状に沿って各座標での光路差0位置は異なる光軸位置にある。細かくスキャンしつつ逐次ホログラムを記録したとき、得られる各々の再生像には物体と参照ミラーとの光路差が等しくなったところで再生像強度が高く得られる。図1下側には得られた再生像を示しており、その中の軸A、Bに示すように、得られた再生像振幅の各座標を光軸方向にプロットすると光路差0位置で最大ピークをもつグラフ形状が得られる。面方向の各座標に対し、この光路差0位置を求めることによって光路差0位置、すなわち物体形状を測定する。また、この光路差0位置でのピーク値を求めることによって物体の振幅反射率（反射物体の場合）もしくは振幅透過率（透過物体の場合）を同時に測定することができる。

2.2 計測機構

マイケルソン干渉計をベースとした計測機構を構築した。構築光学系を図2に示す。光源には赤、緑、青の3色のファイバ出力LED光源を用いた。用いた光源の仕様を表1に示す。各光源からの光波を光力

表1 光源のスペック

	Red	Green	Blue
Center wavelength	625 nm	530 nm	470 nm
Coherence length	17.2 μm	8.3 μm	13.0 μm

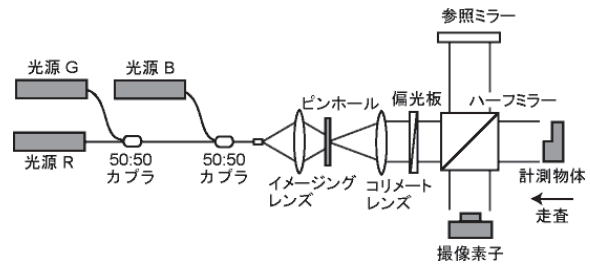


図2 3次元形状-スペクトル特性同時計測機構

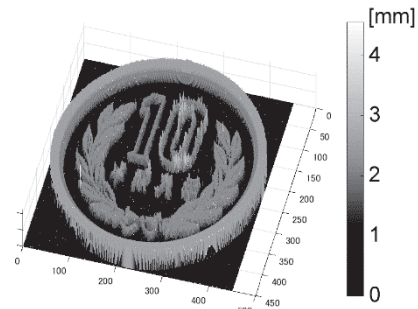


図3 形状計測分布

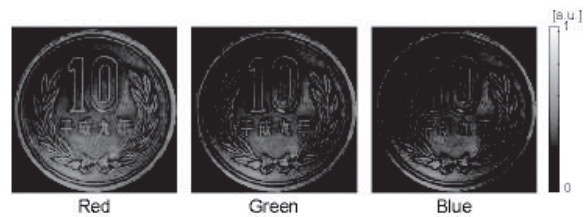


図4 スペクトル振幅反射率分布

で合波し、3色の光波をファイバ端面から出力する。出力後の光波はイメージングレンズでピンホールに照射した後、コリメートする。ピンホールでは光波の一部を取り出し、光源の空間コヒーレンスを高める作用を与えている。偏光板を通過した後、ハーフミラーで物体光と参照光に分波する。物体光側は計測物体に照射した後に撮像素子へ入射し、参照光との干渉縞を撮像素子で記録する。計測物体は1軸方向にスキャンし、表面形状を計測する。

2.3 確認実験

図2に示す光学系を用いて、物体の3次元形状とスペクトル反射率特性の同時計測をおこなった。計測物体には10円硬貨を用いた。Off-axis光学配置により物体の低コヒーレンスホログラムを記録した。物体スキャンは試験的に10 μm 間隔で500回おこなった。各ホログラム記録において露光枚数を増やし時間平均を求めることにより、熱雑音などの時間的

ランダムなノイズの低減を図った⁽⁷⁾.

得られた 3 次元形状分布とスペクトル反射率分布をそれぞれ図 3, 図 4 に示す. 反射率・形状分布ともに記録物体の計測できていることが分かる. 形状分布においては回折などの影響でエッジ部分にエラーが出ている箇所もあるものの, 大まかな記録物体の形状は十分に観測可能であることが分かった. 反射率分布も定性的ではあるが目視での色情報と概ね一致した結果が得られている. 現段階では, 未だ物体形状・振幅反射率の計測精度の定量評価はできておらず, 今後, 物体形状・振幅反射率 (もしくは透過率) の測定値が既知の物体を用いた評価実験を実施する予定である.

また, 今回の確認実験では Off-axis 配置で記録システムを構築したため, 用いた撮像素子の分解能を十分に活かしていない. これを解決する方策として新しいシングルショット位相シフト法を提案したので 3 章にて詳述する.

3. 傾斜位相を用いた補間レスシングルショット位相シフトデジタルホログラフィ

Off-axis 配置では撮像素子の分解能が十分に活かせず, 位相シフト法の導入を検討する. しかしながら, 低コヒーレンスデジタルホログラフィでは物体のスキャンを要するため, 複数枚の記録が必要な時分割位相シフト法⁽⁸⁾の導入は難しい. そこで, シングルショットかつ位相シフターを用いない, 簡易で実用性の高いシングルショット位相シフト法およびその解析アルゴリズムを新たに提案した. 本章では, 提案する傾斜位相を用いた補間レスシングルショット位相シフト法と, 数値シミュレーションによる本手法の有効性の検証結果, 他手法との比較結果について述べる.

3. 1 原理および解析アルゴリズム

提案手法は, 平面波を傾けた際にその波面の傾きが撮像素子面上で位相変化を生じさせることを利用し, 撮像素子の画素ごとの位相変化を位相シフト量として解析する方法である. 図 5 にホログラム記録の概念図を示す. 図 5 はマイケルソン干渉計の一部を示している. 光源からの光波を物体側と参照ミラー側に分波し, それらの反射光からなる干渉縞を撮

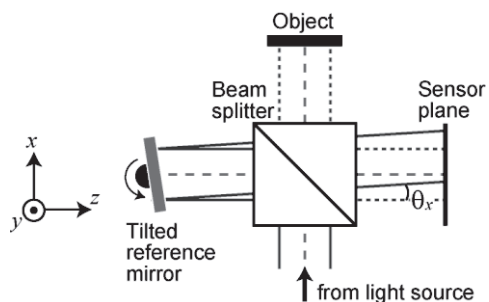


図 5 光学系の概念図

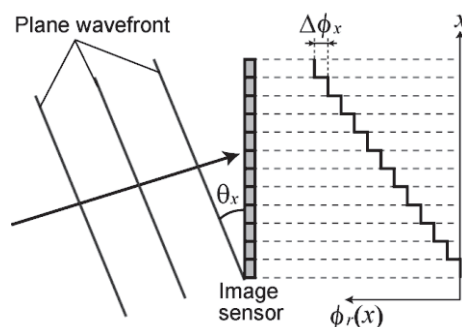


図 6 参照光傾斜と撮像素子面上の位相の関係

像素子で記録する. 参照ミラーをわずかに傾け, 撮像素子面上で画素ごとに異なる位相変化を発生させる. 参照光の傾斜角と撮像素子面上の位相変化の関係を図 6 に示す. x, y 軸方向それぞれの参照光の撮像素子面に対する傾きを θ_x, θ_y とする. 図 6 中には簡単化のため x 軸方向についてのみ示している. このとき, 撮像素子面上の画素ごとの位相差は参照光の傾斜角に依存し,

$$\begin{aligned} \Delta\phi_x &= \frac{2\pi\Delta x \tan\theta_x}{\lambda} \\ \Delta\phi_y &= \frac{2\pi\Delta y \tan\theta_y}{\lambda} \end{aligned} \quad (1)$$

となる. ここで, λ は光源の波長, $\Delta x, \Delta y$ はそれぞれ撮像素子の x, y 軸方向のサンプリング間隔である.

(1) 式から, 例として, $\Delta\phi_x = \pi, \Delta\phi_y = \pi/2$ のとき, $\theta_x = \tan^{-1}(1/2\Delta x), \theta_y = \tan^{-1}(1/4\Delta y)$ が得られる. このとき, 撮像素子面上での参照光の位相分布は図 7 左側に示す分布となる. 提案手法ではこの位相分布を用いて位相シフト解析をおこなう. 図 7 に提案アルゴリズムの解析方法の概念図を示す. この解析方法では算出する物体光の複素振幅は 2×2 の隣接 4 画素の中央座標の値として算出する. 位相シフト法の解析はこの隣接 4 画素ごとにおこない, このとき各画素での干渉縞強度は

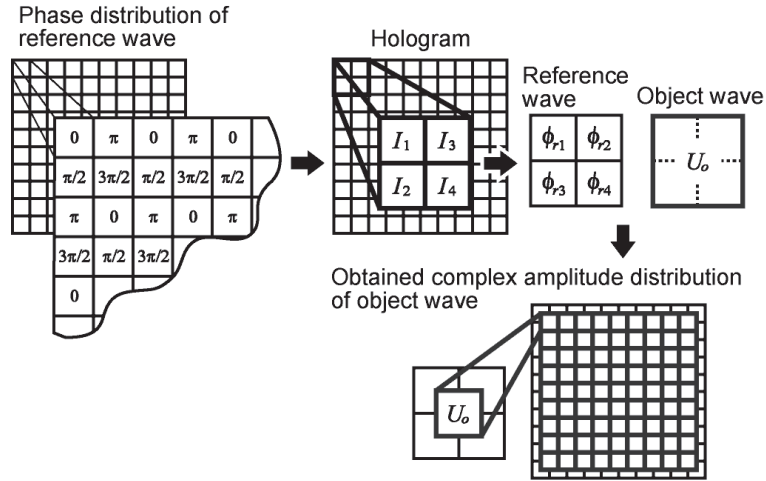


図7 解析アルゴリズムの概念図

$$\begin{aligned}
 I_1 &= a_o^2 + a_r^2 + 2a_o a_r \cos \phi_o, \\
 I_2 &= a_o^2 + a_r^2 + 2a_o a_r \cos \left(\phi_o - \frac{\pi}{2} \right), \\
 I_3 &= a_o^2 + a_r^2 + 2a_o a_r \cos (\phi_o - \pi), \\
 I_4 &= a_o^2 + a_r^2 + 2a_o a_r \cos \left(\phi_o - \frac{3\pi}{2} \right)
 \end{aligned} \quad (2)$$

と与えられる。ここで、 a_o 、 ϕ_o は物体光の振幅および位相であり、 a_r は参照光の振幅である。参照光は平行光であるため、 a_r は撮像素子面上で一様と置くことができる。このとき、物体光の複素振幅は

$$U_o = \frac{(I_1 - I_3) + i(I_2 - I_4)}{4} \quad (3)$$

と与えられる。ここで、 i は虚数単位である。これに

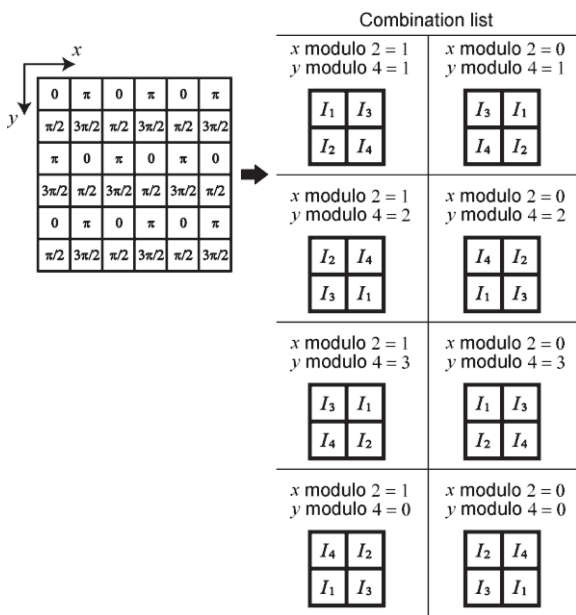


図8 位相シフト解析のための干渉縞強度の組み合わせ

より物体光の複素振幅をシングルショットにより求めることができる。

図7に示すように参照光の位相分布は x 軸方向には2画素ずつ、 y 軸方向には4画素ずつ周期的に繰り返す。そのため、位相シフト解析において、図8に示すように (x, y) 座標に対して I_j ($j=1, 2, 3, 4$)の組み合わせを考える必要がある。図8に示すように位相分布の周期的構造に沿った $2 \times 4 = 8$ 通りの解析を繰り返すことにより物体光の複素振幅分布を算出する。

3. 2 記録・再生シミュレーション

記録・再生シミュレーションの概念図を図9に示す。まず、入力した物体光の複素振幅分布を光波回折伝搬計算⁹⁾により物体面から距離 z 離れたホログラム面まで伝搬し、参照光とのホログラム(干渉縞)を算出する。位相シフト解析により物体光の複素振幅

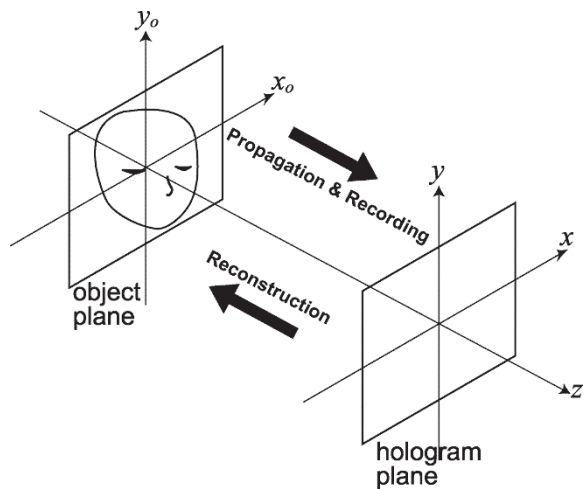


図9 記録・再生シミュレーションの概念図

表2 シミュレーションパラメータ

Wavelength	632.8 nm
Sampling pitch	8 μm
Number of sampling	512 x 512
Propagation distance	250 mm

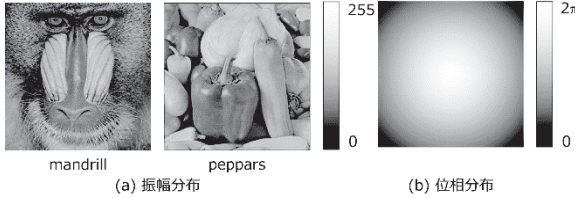


図10 使用した物体振幅および位相

分布を算出し、物体面まで逆再生し、得られる再生像を比較・評価する。

シミュレーションパラメータを表2に示す。入力した物体光の複素振幅を図10に示す。振幅には2通りのものを用意した。また、物体位相には曲率半径800 mmの球面位相を用いた。提案手法に対する比較対象の従来手法として、位相シフト解析に線形補間を用いる波面分割位相シフト法^(10,11)を検討・評価した。波面分割位相シフト法の詳細は省く。

各手法により得られた再生像を図11に示す。各手法とも元の複素振幅分布がおおむね再生されていることがわかる。再生位相に関しては両手法とも中央が黒くなっているが、この結果は相対位相を表しているため、0と2πの値が等しいことを意味する。そのため、元位相が2πのところはわずかな測定誤差で位相値が>0となることは容易に考えられる。結果として提案手法と従来手法を比較して定性的に顕著な差は見られなかった。

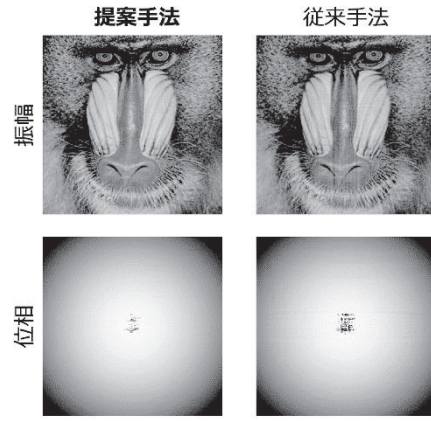
次に再生像品質をPSNR（ピーク信号対雑音比）⁽¹²⁾により定量評価した。PSNRは

$$\text{PSNR} = 10 \log_{10} \frac{M^2}{\text{MSE}} \quad (4)$$

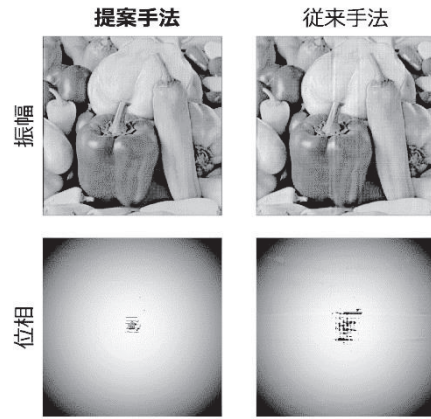
と定義される。ここで、 M は評価分布の取り得る最大値であり、 MSE は平均二乗誤差を意味する。 MSE は

$$\text{MSE} = \frac{1}{N_x N_y} \sum_{x=1}^{N_x} \sum_{y=1}^{N_y} \{A(x,y) - A_o(x,y)\}^2 \quad (5)$$

と定義される。ここで、 A 、 A_o はそれぞれ再生振幅および元振幅である。また、 N_x 、 N_y は x 、 y 軸方向それ



(a) mandrill



(b) peppers

図11 各手法の再生像

ぞれのサンプリング数である。再生位相の評価に関しては、再生位相と元位相との複素平面上での差分を評価するために

$$\text{MSE} = \frac{1}{N_x N_y} \sum_{x=1}^{N_x} \sum_{y=1}^{N_y} \left\{ e^{i\Phi(x,y)} - e^{i\Phi_o(x,y)} \right\}^2 \quad (6)$$

とする。ここで、 Φ 、 Φ_o はそれぞれ再生位相および元位相である。PSNRは値が高いほど再生精度が高いといえる。

得られたPSNRを表3に示す。従来手法と比較し、提案手法の結果がより高い数値が得られ、提案手法のほうが優れていることがわかった。シミュレーション

表3 各再生像に対するPSNR (dB)

		Proposed	Conventional
mandrill	Amp.	32.3	32.2
	Phase	37.0	35.1
peppers	Amp.	30.4	26.1
	Phase	36.0	32.9

ョンでは雑音等は与えず理想状態での解析をおこなったため、位相シフト解析における補間処理の有無による影響のみを評価したと結果といえる。提案手法は補間レスな解析アルゴリズムとなっており、ミラーの傾きという非常に簡易な操作のみで実現できる有効な位相シフト解析法であると考えられる。

3.3 物体振幅値の変化に対する位相再現度特性

従来の波面分割位相シフト法^(10,11)では、物体振幅の明暗の変化が大きい場合、その変化の激しい箇所での振幅分布のパターンに応じた劣化が再生位相に見られることがわかっている。解析アルゴリズムが近い提案手法にも同様の傾向が見られる可能性があるため、シミュレーションにより調査した。図12に示す振幅情報を用いて3.2節と同様に記録・再生シミュレーションを実施した。位相分布には図10(b)に示すものと同じものを用いた。振幅の暗部はその値を1から60まで1ずつ増加させていき、そのときの再生位相をPSNRで評価し、提案手法と従来手法の性能を比較した。

位相再現度特性結果を図13に示す。PSNRは暗部振

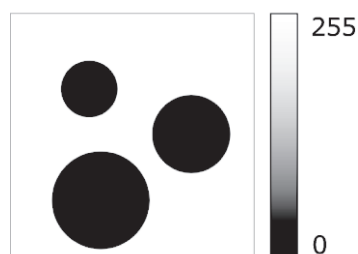


図12 位相再現度特性評価の振幅分布

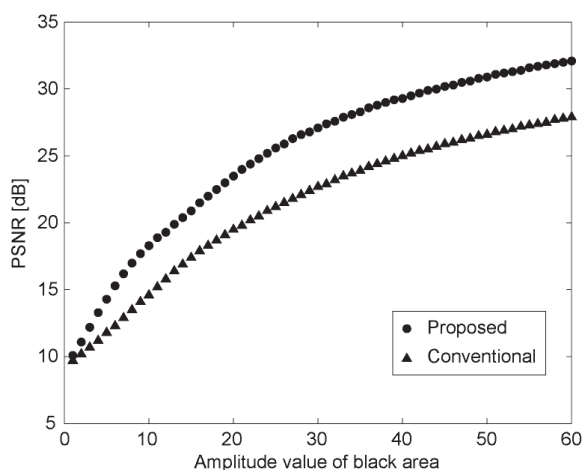


図13 位相再現度特性結果

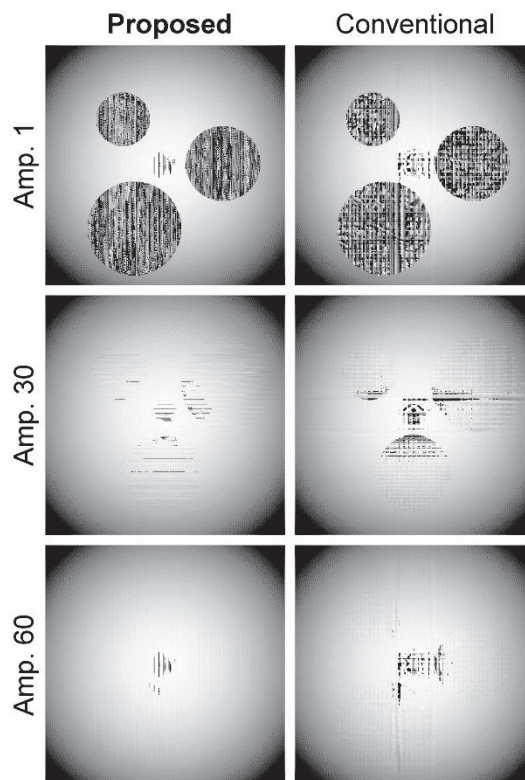


図14 位相再現度特性評価の再生位相

幅値が大きくなるにつれ増加していく。基本的には両手法とも暗部振幅と明部振幅との差が小さいほど再生品質が高くなることを示した。提案手法は常に従来手法よりもPSNRが高く再生品質が高い結果となった。暗部振幅値が45で提案手法はPSNRが30 dBを超えたが従来手法は振幅値60でもPSNRは30 dB未満であった。暗部振幅値が1, 30, 60のときの両手法の再生位相分布を図14に示す。振幅値1では両手法ともに位相分布に元振幅の分布が劣化として明確に現れていることがわかる。振幅値30では従来手法に比べて提案手法の劣化が低減されており、振幅値60では従来手法ではまだ劣化が残っているものの提案手法の劣化はほとんど見られないことがわかる。

3.4 空間周波数に対する再生品質特性

空間周波数の再現能力を従来手法と比較するためMTF曲線によるコントラスト評価を実施した。評価ターゲットとして図15に示す振幅分布を用いて記録・再生シミュレーションを実施した。位相分布には図10(b)に示すものを用いた。図15中に記載している数字は各周波数ターゲットの幅の画素数を示しており、縦方向・横方向の1~5画素幅の三本線の再現能力を各手法で比較した。得られた再生像の各三本線

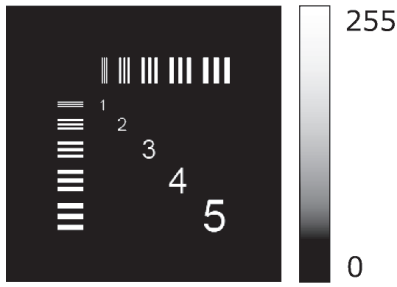


図15 評価ターゲットの振幅分布

に対する明暗のコントラストを算出した。コントラストは

$$C = \frac{\overline{W} - \overline{B}}{\overline{W} + \overline{B}} \quad (7)$$

で与えられる。ここで、 \overline{W} 、 \overline{B} はそれぞれ明部と暗部の画素値の平均値である。コントラストは最大値が1であり、値が大きいくほど明暗の差が鮮明であるといえる。(7)式によりコントラストを算出し、各空間周波数に対するコントラスト値をグラフにした MTF 曲線から両手法を比較した。

まず得られた両手法による再生像を図16に示す。従来手法は白い霧のような像が見られる。それに対し、提案手法ではそのようなノイズはほとんど見られず鮮明な像が得られており、定性的に提案手法の有効性が見られる。

次に MTF 曲線を図17に示す。図17(a)が横方向の図17(b)が縦方向の空間周波数に対しての MTF 曲線である。コントラストは常に提案手法の方が高く、図16の定性的評価とも一致する結果となった。最も空間周波数の高いところでは両手法とも非常に低いコントラストとなった。従来手法ではコントラストがほぼ0となり、再生能力がないことがわかった。それに対して提案手法では値は低いもののコントラスト

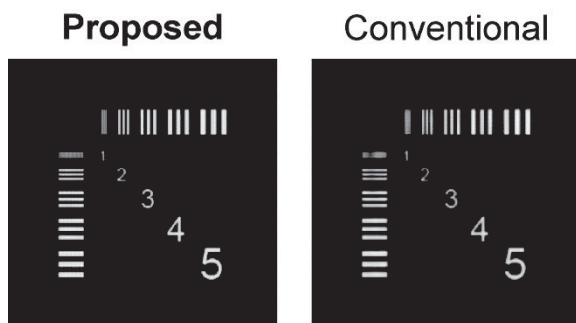
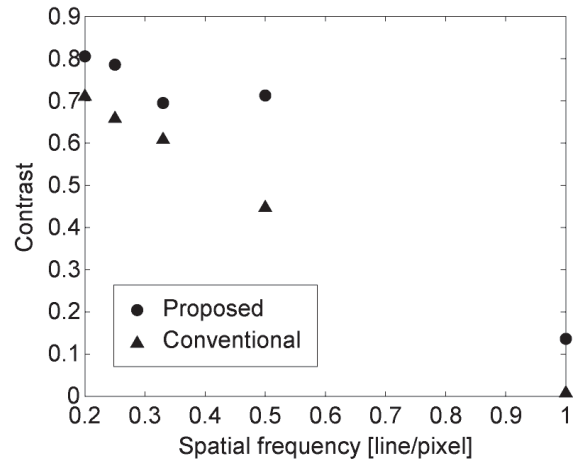
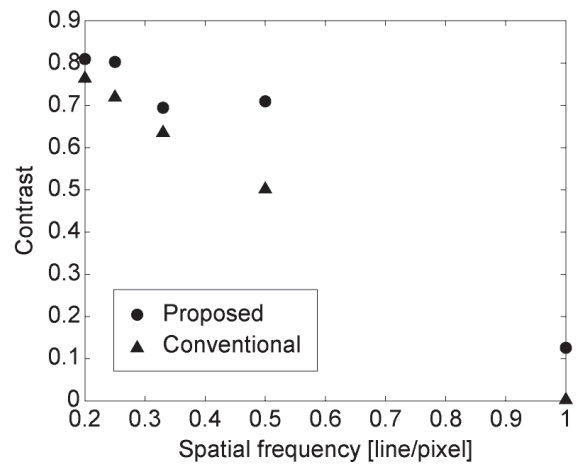


図16 空間周波数再現評価の再生像



(a) 横方向の空間周波数



(b) 縦方向の空間周波数

図17 MTF 曲線

は正の値となり、この空間周波数まで再生能力があるということがわかった。

両手法内の縦横方向の性能では、ほとんど変化が見られなかった。縦横の差で大きく影響するのはホログラムのサンプリング数であり、今回のシミュレーションでは縦・横ともに512画素であるため、変化がないのは妥当である。一般的な撮像素子では縦長あるいは横長のものが大半であり、その場合の性能調査は今後の課題である。

4 まとめ

本研究では、多種多様パラメータの同時計測技術の開発のために、LCDHによるスペクトル反射光強度特性、物体3次元形状計測の同時計測技術の確立を目指し、物体形状計測とスペクトル反射率分布の同時計測達成と計測の高解像度化および高速化のための新しいシングルショット位相シフトデジタルホ

ロググラフィの開発に取り組んだ。物体形状計測-スペクトル反射率分布同時計測の原理確認実験では記録物体の多種パラメータ同時計測に成功した。計測精度の評価は現段階ではおこなえておらず今後の課題であるとする。さらに、本実験システムの改良策として、新たな位相シフト法とその実験配置を考案し、コンピュータシミュレーションによる有効性の評価をおこなった。3種類の評価項目について従来手法との性能比較を実施し、すべてにおいて提案手法の有効性が実証された。現段階では個々の技術として調査等をおこなったが、今後、これらを複合した高速-高分解能を有する同時計測システムを確立する。

発表論文

[1] Y. Mori and M. Yukinari, *Opt. Lett.* 投稿中

参考文献

- (1) D. A. Norman, *Interactions*, 14-19 (2005).
- (2) T. Keinonen, *Proc. 5th Nordic Conference on Human-Computer Interaction: Building Bridges*, 211-219 (2008).
- (3) H. Haruma, M. Ohmi, T. Mitsuyama, H. Tajiri, H. Maruyama, and M. Hashimoto, *Opt. Lett.* **23**, 966-968 (1998).
- (4) L. Yuan, L. Zhou, and W. Jin, *Opt. Lett.* **25**, 1074-1076 (2000).
- (5) Y. Hayasaki, *Opt. Rev.* **22**, 731-735 (2015).
- (6) Z. Monemhaghdoust, F. Montfort, Y. Emery, C. Depeursinge, and C. Moser, in *Digital Holography and Three-Dimensional Imaging (OSA Technical Digest, OSA, 2013)*, paper DW1A.2 (2013).
- (7) T. Nomura, K. Yoshino, T. Numata, and E. Nitani, in *Digital Holography and Three-Dimensional Imaging (OSA Technical Digest, OSA, 2010)*, paper JMA25.
- (8) I. Yamaguchi and T. Zhang, *Opt. Lett.* **22**, 1268-1270 (1997).
- (9) K. Matsushima and T. Shimobaba, *Opt. Express* **17**, 19662-19673 (2009).
- (10) Y. Awatsuji, M. Sasada, and T. Kuroda, *Appl. Phys. Lett.* **85**, 1069-1071 (2004).
- (11) L. M. León, M. Araiza-E, B. Javidi, P. Andrés, V. Climent, J. Lancis, and E. Tahuerce, *Opt. Express* **17**, 12900-12909 (2009).
- (12) Q. Huynh-Thu and M. Ghanbari, *Electro. Lett.* **44**, 800-801 (2008).