光コム参照型シンセサイザを用いたカスケードリンク多波長デジタルホログラフィ
Cascade link multi-wavelength digital holography using optical frequency comb referenced synthesizer

徳島大学 [1]，JST, ERATO 美濃島知的シンセサイザ [2]，ボルドー大学 [3]，宇都宮大学 [4]
○ (P)山際将具 [1,2]，(M2)小川貴之 [1]，(B4)川人勇介 [1]，トロヴァト・クレモン [3]，
南川丈夫 [1,2]，山本裕紹 [2,4]，安井武史 [1,2]
°M. Yamagiwa[1,2], T. Ogawa[1], Y. Kawahito[1], C. Torovato[3], T. Minamikawa[1,2], H. Yamamoto[2,4], and T. Yasui[1,2]
Tokushima Univ.[1], JST, ERATO MINOSHIMA IOS [2], Univ. of Bordeaux[3], Utsunomiya Univ. [4]
E-mail: yamagiwa@femto.me.tokushima-u.ac.jp

1. イントロダクション

デジタルホログラフィ（DH）は，物体からの光と参照光の干渉縞を CCD 等のデジタル撮像素子で記録し，その干渉縞データを用いてコンピュータ内で波面伝搬計算を行うことで，物体の振幅と位相を再生する技術である．DH は 3 次元イメージングが可能なため，形状計測にも応用されている．しかし，従来の単一波長を用いた DH では，物体が波長以上の高さを持つ場合，位相が 2π 周期で折り畳まれる．そこで，複数のレーザ光による合成波長を用いた DH が提案されている [1]．しかし，多くは固定した波長を用いており，生成可能な合成波長が制限され，位相アンラッピングなしで測定できる最大高さは数 10 um であった．

本研究では，広帯域で波長可変な光シンセサイザ(OFS)[2]を光源とした，カスケードリンク型マルチ合成波長 DH を提案する．単一波長とマルチ合成波長のカスケードリンクにより，高さ方向のダイナミックレンジを大幅に拡大し，位相アンラッピングなしで数十 mm オーダーの表面形状を数十 nm の精度で計測することを目指す．

2. 原理

本システムで使用する OFS は，等間隔で櫛状にスペクトルが並ぶ，光周波数コムのモードの 1 つにシングルモード CW レーザを位相同期させた，高安定な波長可変レーザである．1.5 μm ~ 1.6 μm の波長を 1 pm 刻みで設定することが可能である．Fig.1 に OFS で生成可能な合成波長を示す．合成波長 $\Lambda = (\lambda_1\lambda_2) / |\lambda_2-\lambda_1| = (\lambda_1\lambda_2) / \Delta\lambda$ とし，波長 λ_1=1500 nm, λ_2の波長を変化させた場合, 24 μm - 2.25 m の範囲で，任意の合成波長を生成できる．複数の合成波長を利用することにより，物体の高さ H は次の関係式で表すことができる．

$$H = \left(N_\lambda + \frac{\phi_\lambda}{2\pi}\right)\lambda = \left(N_{\Lambda_1} + \frac{\phi_{\Lambda_1}}{2\pi}\right)\Lambda_1 = \left(N_{\Lambda_2} + \frac{\phi_{\Lambda_2}}{2\pi}\right)\Lambda_2 = \cdots = \left(N_{\Lambda_i} + \frac{\phi_{\Lambda_i}}{2\pi}\right)\Lambda_i$$

λ は単一波長，Λ は合成波長，ϕ は位相, N は 2π の次数である．ある合成波長での N が判明すれば，物体の高さ H を求めることができ，他の合成波長での N も算出することができる．H には位相ノイズが Λ/100 程度含まれてしまうが，より短い合成波長に順次繋げていくことで，位相ノイズを低減していくことができる．最終的に単一波長 λ に繋げれば，位相ノイズをλ/100 程度まで抑えることができる．長い合成波長を設定すれば，大きな物体でも，単一波長での位相ノイズで形状計測ができる．これがカスケードリンクである．Fig. 2 は光シンセサイザを用いた場合のカスケードリンクを模式的に表した図である．合成波長 Λ_1 を初期値として単一波長 λ まで順次カスケードリンクしている．理論上では, 2 m 程度の高さの物体を数十 nm の分解能で計測することができる．

3. 実験とまとめ

実験では段差計測として，10 mm 厚ゲージブロックを用いた．光学系はマイケルソン光学系で，OFS を光源としている．物体光と参照光の干渉縞は IR カメラで検出した．位相計算では，コンボルーション法を適用した．合成波長は 40573 μm, 3921 μm, 400 μm, 40 μm，単一波長には 1.520729 μm を用いた．実験の結果を Fig. 3 に示す．測定の結果，10.0015 mm となり，位相アンラッピングなしでゲージブロックの厚さを計測することができた．また，精度を確認したところ, 186 nm となった．今後は，数十 nm の精度で測定できるようシステムを改良する予定である．

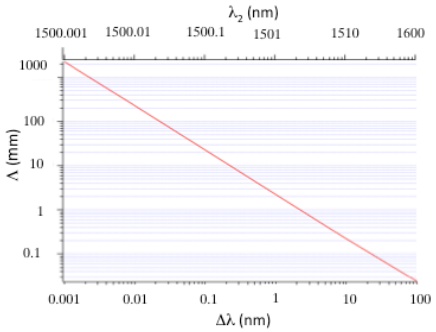

Fig. 1 Synthesized wavelength generated by Optical .frequency synthesizer

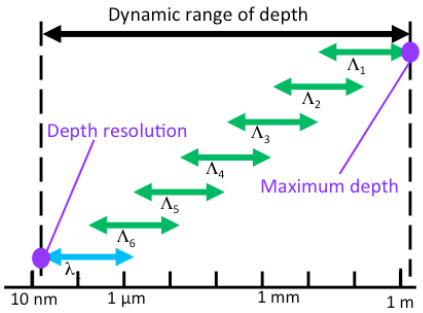

Fig. 2 Cascading link of single wavelengths and multiple synthesized wavelengths.

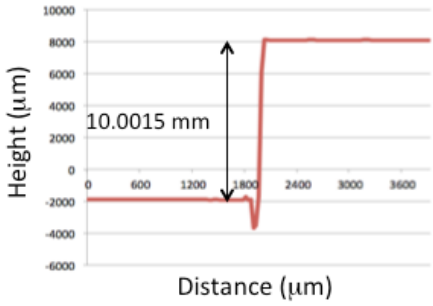

Fig. 3 Experimental result

本研究は, JST,ERATO 美濃島知的シンセサイザ(IOS)プロジェクトによって助成された．

参考文献

1) J. Gass *et al.*, Opt. Lett. **28**, 1141–1143 (2003).
2) T. Yasui *et al.*, Opt. Express **19**, 4428-4437 (2011).