

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成24年 6月 8日現在

機関番号：82626

研究種目：若手研究（B）

研究期間：2010～2011

課題番号：22760071

研究課題名（和文） 高精度三次元形状・変形計測を実現する高次元情報を用いた
時空間位相シフト法の開発研究課題名（英文） Accurate shape and deformation measurement by spatiotemporal
phase-shifting method using high dimensional intensity information

研究代表者

李志遠（RI SHIEN）

独立行政法人産業技術総合研究所・計測フロンティア研究部門・研究員

研究者番号：70509710

研究成果の概要（和文）： 時間軸と空間軸に存在する高次元の輝度情報を活用した高精度な位相解析手法である時空間位相シフト法を開発した。本手法は従来の位相シフト法に比べてカメラのランダムノイズや計測システムの振動による誤差を大幅に低減することができる。シミュレーションおよび形状変位計測実験で本手法の有効性を確認した。段差試験片と半導体パッケージを測定した結果、ミクロンオーダーの精度でミリスケールの物体の形状変形を計測することができた。

研究成果の概要（英文）： A novel phase analysis technique for three-dimensional shape and deformation measurement was proposed, namely, the spatiotemporal phase-shifting method (ST-PSM), which determines phase information of fringe pattern by using high dimensional intensity information in the spatial and temporal domain simultaneously. Simulation and experimental results showed that the phase error caused by random noise of the camera and vibration of the measurement system can be dramatically decreased by the proposed method. As the result, three-dimensional shape and deformation measurement can be performed with the order of micrometer accuracy.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2010年度	1,900,000	570,000	2,470,000
2011年度	1,200,000	360,000	1,560,000
年度			
年度			
年度			
総計	3,100,000	930,000	4,030,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：機械工学・機械材料・材料力学

キーワード：形状変形計測、時空間位相シフト法、位相解析、格子投影法、FLCOS 素子

1. 研究開始当初の背景

高度な電子部品や精密加工品の使用にあたって、信頼性の高い精度のよい検査が要求される。接触式探針プローブは高い測定精度を有するが、点計測であるため、広域な分布を得るのには長い測定時間を要する。

このようなニーズに対して、全視野形状変形計測が行える位相解析を用いた格子投影法が有効な手法である。これまでに開発された位相シフト法は時間的輝度変化から縞画像の位相値を解析する方法であるが、測定ノイズを低減するために撮影枚数を増

やす必要があり、計測精度と計測速度の両立が困難であり、その克服が待たれていた。

2. 研究の目的

以上の背景を踏まえて、本研究はこれまでの発想にはない時間軸と空間軸に存在する高次元の輝度情報を同時に扱う新しい位相解析手法である時空位相シフト法を開発するものである。同手法を格子投影法に適用し、ミリスケール寸法の物体を対象に高さ方向ミクロン精度を達成できる高精度な非接触式三次元形状・変形計測の実現を図る。

2年継続より、(1) 計測理論の確立、(2) 光学系の構築、(3) 高精度・高速化の検討、(4) ミクロン精度の三次元形状計測、(5) サブミクロン精度の微小変形分布計測、なる5項目の研究を推進し、接触式三次元計測器並みの高さ方向ミクロン精度の三次元形状変形計測を達成できる独自の発想による縞画像位相解析法を確立する。

3. 研究の方法

(1) 計測理論の確立

図1に示すように、正弦波の輝度変化をもつ格子画像の位相を少しずつシフトさせながら、撮影された複数枚の縞画像を時系列に並べることで、三次元空間（空間 xy +時間 n ）の縞画像を構築することができる。ここで注目する画素の位相は、従来の位相シフト法の N 個の輝度データ領域とサンプリングモアレ法の M 個の輝度データ領域を囲む局部の2次元空間上の輝度情報を用いて縞画像の位相分布を解析できる。ここで高次元の輝度情報から位相を算出しているため、従来の手法と同じ撮影枚数であるにもかかわらず、カメラのランダムノイズ等を抑えた精度の高い位相解析が可能となる。

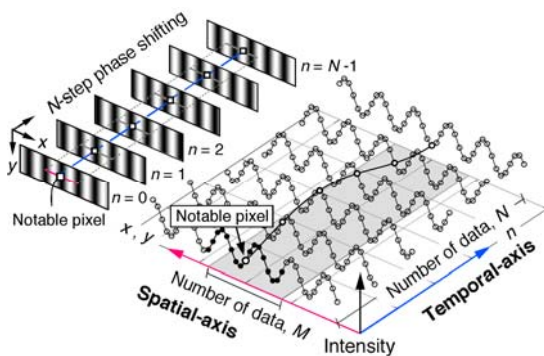


図1 高次元輝度情報を用いた時空位相シフト法の原理

(2) 光学系の構築

本研究では格子投影法を用いて物体の三次元形状・変形計測を行うため、格子模様を高速かつ安定した投影が行えることが重要

である。そこで、市販されている従来の透過型液晶素子の代わりに、強磁性反射型液晶素子である FLCOS 素子を採用することにした。構築した FLCOS マイクロディスプレイを用いた格子投影装置システムを図2に示す。FLCOS 素子は格子パターンを高速で切り替えられる、輝度非線形性がない等の特徴がある。

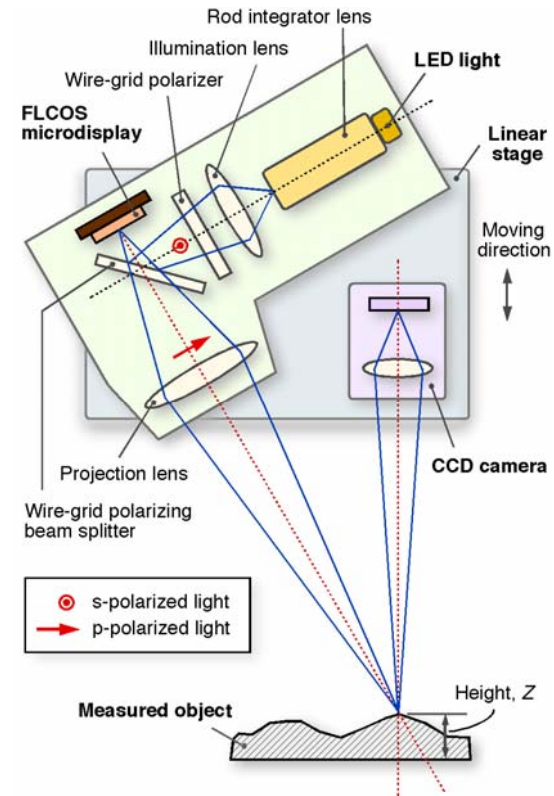


図2 構築した FLCOS マイクロディスプレイを用いた格子投影装置システムの構成

(3) 高精度・高速化の検討

開発したシミュレータを用いて、ランダムノイズおよび位相シフト誤差を付与した場合に従来手法と本手法の理論的精度を検証した。具体的には、① 格子ピッチが 14.1 画素の 4 ステップの位相シフト画像をコンピュータ内で生成し、格子振幅に対して標準偏差が 25% のランダムノイズを加えたものを用いた。これらの格子画像に対して、従来の 4 ステップの位相シフト法と開発した時空位相シフト法でそれぞれ解析し、精度の比較を行った。② 格子ピッチが 14.1 画素の 4 ステップの位相シフトが像をコンピュータ内で生成し、ランダムノイズを加えないかわりに、4 枚の位相シフトした格子画像にそれぞれ $-\pi/10$ 、 $-\pi/15$ 、 $\pi/10$ 、 $\pi/15$ の位相シフト誤差を与え、従来の 4 ステップの位相シフト法と開発した時空位相シフト法でそれぞれ解析し、精度の比較を行った。

(4) ミクロン精度の三次元形状計測

構築した FLCOS 素子による格子投影装置を用いて、高さが既知の段差試験片を測定した。また産業分野で使われている半導体パッケージの反り分布計測を行った。サンプルは 50 mm 角サイズの基板の上にアンダーフィル剤によって 15 mm 角サイズのチップを固定したものである。チップと基板の反射率が異なっているため、従来の位相シフトの場合、反射率の低いチップ部において精度よく計測することが困難である。

(5) サブミクロン精度の微小変形分布計測

(4) で使用している半導体パッケージを温度制御された加熱炉に設置し、高性能ヒーターより室温から 220℃ まで 30℃/分の速度で加熱した場合での温度依存によるパッケージの反り量を測定した。

4. 研究成果

(1) 開発手法の原理確立と精度向上の実証

高精度な三次元形状変形計測可能な時空位相シフト法を開発した。撮影された複数枚の二次元の縞画像を時系列に並べて形成された三次元の縞画像を用いて高精度に格子の位相を算出できるアルゴリズムを考案した。シミュレーションより開発手法の有効性を確認した。

図 3 にランダムノイズのシミュレーション結果を示す。格子振幅に対して 25% のランダムノイズを加えた縞格子画像 (図 3(a)) を従来の位相シフト法 (PSM) と時空位相シフト法 (ST-PSM) で解析した位相分布を比較すると、計測誤差が大幅に低減できたことがわかる。

図 4 に位相シフト誤差のシミュレーション結果を示す。位相シフト誤差を付与した縞格子画像 (図 4(a)) を従来の位相シフト法 (PSM) と時空位相シフト法 (ST-PSM) で比較すると、開発手法では周期的誤差が発生しないことがわかる。

(2) FLCOS 素子による格子投影装置の構築

三次元形状変形計測を行うための格子投影装置を新たに構築した。本格子投影装置では、強磁性反射型液晶素子である FLCOS 素子を用いることで、輝度非線形性のない格子模様を高速に投影することができた。加えて、光源用ライトとして熱を発するハロゲンランプの代わりに、計測時のみ照射する高輝度 LED 光源を採用した結果、熱による格子表示の光学素子の変位や冷却ファンによる振動問題を解決し、安定した形状変形計測が行えることを実験より確認した。またシャインプルーフの光学系を適用し、被写界深度を拡大することができた。その結果、従来斜め方向から格子を投影する方法より奥行きのある物体でも計測することができた。

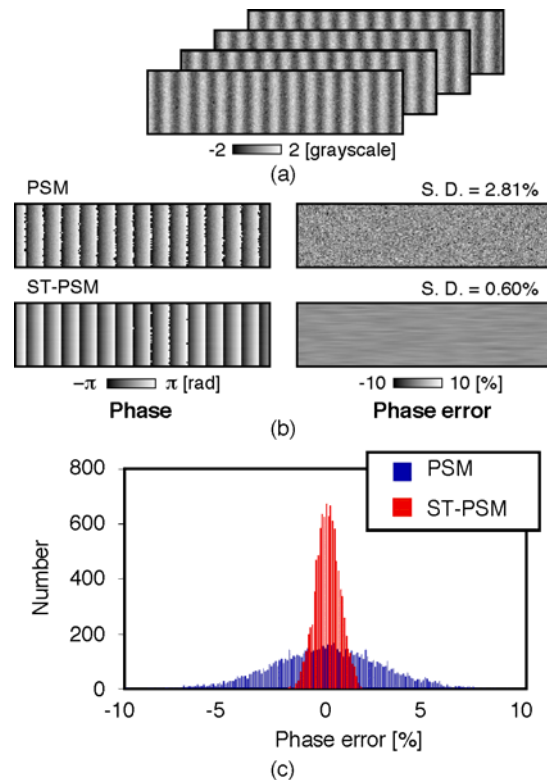


図 3 ランダムノイズのシミュレーション結果

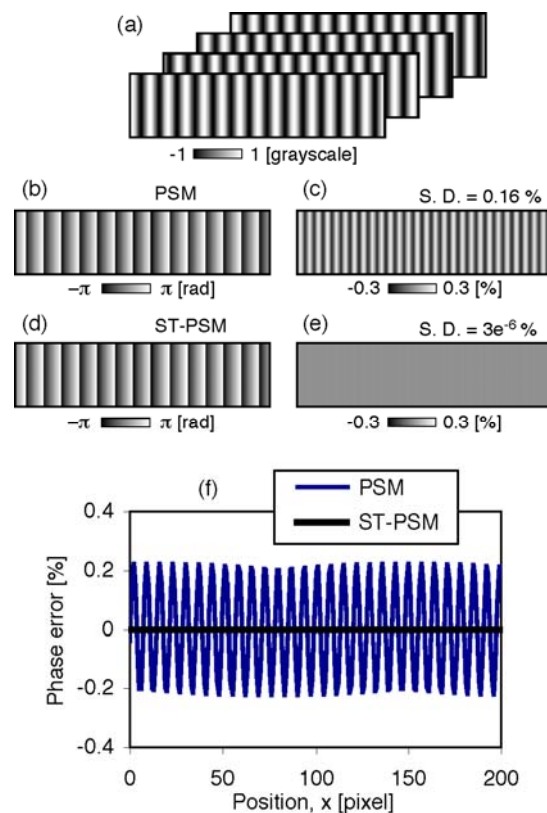


図 4 位相シフト誤差のシミュレーション結果

(3) ミリスケール寸法の構造体の形状計測

開発手法の有効性を確認するために、構築した計測装置を用いて段差試験片の高さ計測および半導体パッケージの反り分布計測を行った。

図5に段差試料の高さ分布の計測結果を示す。図5(a)に実験で用いた段差試験片の写真を示す。図5(b)に非接触式レーザーフォーカス変位計（日立テクノロジー&サービス社製、LS220-MT100MT50）によって得られた高さ分布を示す。図5(c)に開発手法によって得られた高さ分布を示す。各評価エリア（A1～A5）における精度評価を行った結果、レーザーフォーカス変位計の場合の標準偏差が7 μm であるのに対して開発装置の場合は約1 μm であった。また平均値の誤差がレーザーフォーカス変位計と同じく数 μm であった。開発した計測装置ではミクロンオーダーの計測精度を達成することができた。

図6に半導体パッケージの高さ分布の計測結果を示す。図6(a)に実験で用いたサンプルを示す。図6(b)に8ステップの位相シフトした縞格子が像を示す。図6(c)に従来の位相シフト法によって得られた反り分布であり、基板部にわずかであるが周期的な計測誤差が見受けられた。また反射率の低いチップ部では計測結果のばらつきが大きくなっている。図6(d)に開発した時空位相シフト法によって得られた反り分布である。基板部での周期的計測誤差やチップ部でのばらつきが低減され、精度のよい反り分布計測を行えたことを確認できた。

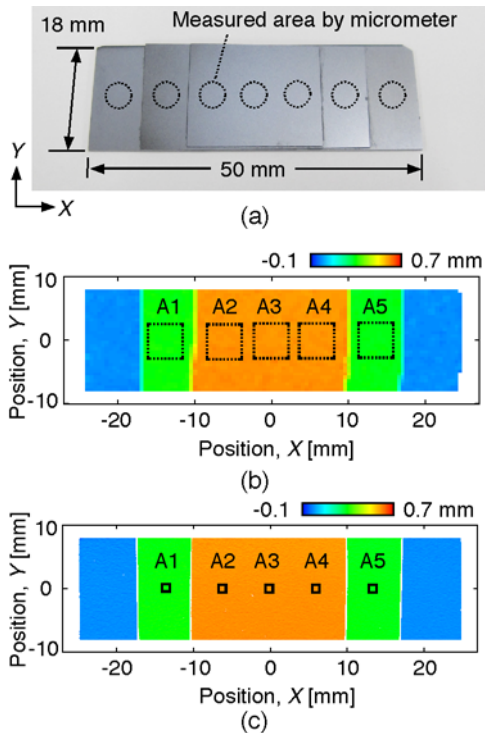


図5 段差試料の高さ分布計測

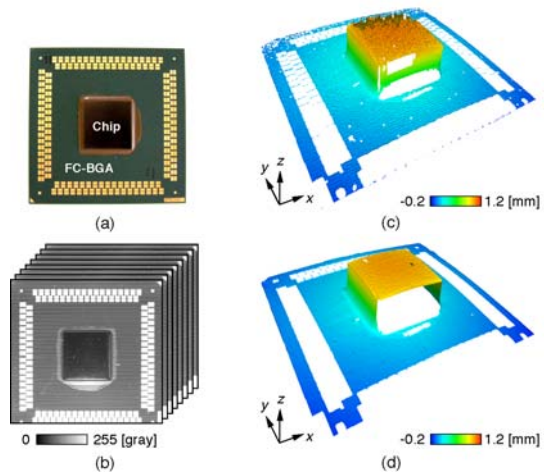


図6 半導体パッケージの高さ分布計測

(4) 半導体パッケージの反り計測への適用

産業分野におけるミリスケール寸法の構造体の変形計測への応用の一例として、50ミリ角サイズの半導体パッケージの温度依存の反り分布計測に適用した。室温から220 $^{\circ}\text{C}$ の加熱時の動的な反り分布変化を計測することに成功した。図7に実験で得られた反り量の結果を示す。室温ではもっとも反り量が大きく、温度が高くなるにつれて基板全体がフラットになっていく様子がわかる。また同じ温度のもとで連続的に20回計測結果、10 \times 10画素の領域の平均値のばらつきの標準偏差は0.3 μm であり、安定した変位計測を行えたことを確認できた。

同計測手法および計測システムにより、半導体パッケージの形状および温度変化中の反り分布をミクロンオーダーの精度で計測することができた。

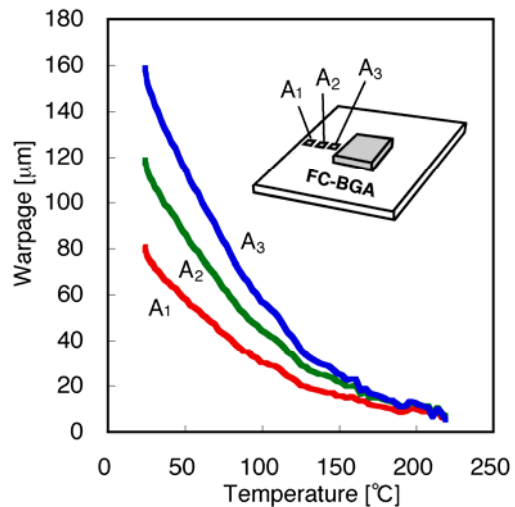


図7 半導体パッケージの温度依存の反り分布計測

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計6件)

- ① S. Ri, T. Muramatsu, M. Saka, H. Tanaka, Y. Okabe, H. Suzuki, Accurate Measurement of Temperature-Dependent Warpage Distribution of Electronic Packaging Using FLCOS-based Fringe Projection Profilometry, Journal of Solid Mechanics and Materials Engineering, 査読有, **6-6** (2012), in-press. DOI: 未決定
- ② S. Ri, T. Muramatsu, M. Sakam H. Tanaka, Fast and Accurate Shape Measurement System Utilizing the Fringe Projection Method with a Ferroelectric Liquid-Crystal-on-Silicon Microdisplay, Optical Engineering, 査読有, **51-8** (2012), 081506 (8pp). DOI: 10.1117/1.OE.51.8.081506
- ③ S. Ri, T. Muramatsu, Theoretical Error Analysis of the Sampling Moiré Method and Phase Compensation Methodology for Single-shot Phase Analysis, Applied Optics, 査読有, **51-16** (2012), 3214-3223. DOI: 10.1364/AO.51.003214
- ④ S. Ri, T. Muramatsu, M. Saka, K. Nanbara, D. Kobayashi, Accuracy of the Sampling Moiré Method and its Application to Deflection Measurements of Large-Scale Structures, Experimental Mechanics, 査読有, **52-4** (2012), 331-340. DOI: 10.1007/s11340-011-9491-2
- ⑤ S. Ri, T. Muramatsu, M. Saka, A Phase Compensation Technique of Sampling Moiré Method for Accurate Single-shot Phase Analysis, Applied Mechanics and Materials, 査読有, **70** (2011), 243-248. DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMM.70.243
- ⑥ 李志遠, 藤垣元治, サンプリングモアレ法による微小変位分布計測技術とその応用, 実験力学, 査読有, **10-4** (2010), 455-458. DOI: なし

[学会発表] (計7件)

- ① S. Ri, Spatio-Temporal Phase Shifting Method for Accurate Phase Analysis using 2-D Discrete Fourier Transform, 5th Int. Conf. on Optical Measurement Techniques (OPTIMESS2012), 2012年4月4日, ベルギー・アントワープ.
- ② S. Ri, T. Muramatsu, M. Saka, H. Tanaka, Y. Okabe, H. Suzuki, Accurate Measurement of Temperature-Dependent Warpage Distribution of Electronic Packaging Using FLCOS-based Fringe Projection Profilometry,

Int. Conf. on Advanced Technology in Experimental Mechanics 2011, 2011年9月22日, 神戸.

- ③ S. Ri, T. Muramatsu, M. Saka, A Phase Compensation Technique of Sampling Moiré Method for Accurate Single-shot Phase Analysis, BSSM Int. Conf. on Advances in Experimental Mechanics, 2011年9月8日, イギリス・エディンバラ.
- ④ 李志遠, 村松尚, 位相シフト法における誤差伝播の理論解析, 日本実験力学会 2011年度年次講演会, 2011年9月1日, 奈良.
- ⑤ 村松尚, 李志遠, 坂真澄, LCoS マイクロディスプレイを用いた格子投影法による高精度反り分布測定装置の開発, 日本機械学会東北支部第46期総会・講演会, 2011年3月15日, 仙台.
- ⑥ 李志遠, モアレ法による最新の微小変位分布測定技術と大型構造物への応用, 日本非破壊検査協会東北支部・産学官連携研究会 (特別講演), 2011年2月17日, 仙台.
- ⑦ 村松尚, 李志遠, 坂真澄, 高精度な位相解析を実現するサンプリングモアレ法における位相補正手法の開発, 日本実験力学会 2010年度年次講演会, 2010年8月18日, 長崎.

[産業財産権]

○出願状況 (計1件)

名称: 高次元輝度情報を用いた縞画像の位相分布解析方法、装置およびそのプログラム

発明者: 李志遠

権利者: 独立行政法人産業技術総合研究所

種類: 特許権

番号: 特願 2012-57436

出願年月日: 2012年3月14日

国内外の別: 国内

[その他]

ホームページ等

<http://unit.aist.go.jp/riif/shmrg/index.html>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

李 志遠 (RI SHIEN)

産業技術総合研究所・

計測フロンティア研究部門・研究員

研究者番号: 70509710

(2) 研究分担者 なし

(3) 連携研究者 なし