

(19) 日本国特許庁(JP)

(12) 特許公報(B2)

(11) 特許番号

**特許第6486010号
(P6486010)**

(45) 発行日 平成31年3月20日(2019.3.20)

(24) 登録日 平成31年3月1日(2019.3.1)

(51) Int. Cl. F I
GO 1 B 11/25 (2006.01) GO 1 B 11/25 H
GO 6 T 1/00 (2006.01) GO 6 T 1/00 3 1 5

請求項の数 2 (全 19 頁)

<p>(21) 出願番号 特願2014-47412 (P2014-47412) (22) 出願日 平成26年3月11日(2014.3.11) (65) 公開番号 特開2015-172487 (P2015-172487A) (43) 公開日 平成27年10月1日(2015.10.1) 審査請求日 平成29年2月16日(2017.2.16)</p>	<p>(73) 特許権者 504145283 国立大学法人 和歌山大学 和歌山県和歌山市栄谷930番地 (74) 代理人 110001151 あいわ特許業務法人 (72) 発明者 藤垣 元治 和歌山県和歌山市栄谷930 和歌山大学 システム工学部光メカトロニクス学科内 (72) 発明者 島 淳 和歌山県和歌山市野崎109-17 審査官 小野寺 麻美子</p>
---	--

最終頁に続く

(54) 【発明の名称】 形状計測装置および形状計測方法

(57) 【特許請求の範囲】

【請求項1】

物体表面の反射率の変化に対する三次元計測誤差の低減を行なう三次元計測方法であって、

カメラと、カメラの周囲に設置した複数の格子投影装置を用いて、各画素において重みを予め求めておき、前記予め求められた重みを元にして前記各格子投影装置を用いて得られた前記物体表面の高さ情報の重み付け平均を画素ごとに行う三次元計測方法。

【請求項2】

物体表面の反射率の変化に対する三次元計測誤差の低減を行なう三次元計測方法であって、

カメラと、前記カメラの周囲に設置した複数の格子投影装置を用いて、各画素において重みを予め求めておき、前記予め求められた重みを元にして前記各格子投影装置を用いて得られた前記物体表面の空間座標情報の重み付け平均を画素ごとに行う三次元計測方法。

【発明の詳細な説明】

【技術分野】

【0001】

本発明は、物体表面の反射率の変化に対する三次元計測誤差低減手法と装置に関する。

【背景技術】

【0002】

物体の三次元形状を計測する技術として、非特許文献 1 には、複数のカメラと鏡を用いることで複数方向からの計測を行い、計測結果の合成によりハレーションや自己隠蔽による影響を回避する技術が開示されている。鏡を用いることで、カメラ台数以上の方向からの計測を行う事が出来る。

【 0 0 0 3 】

また、特許文献 1 には、格子投影法を用いて形状計測を行う場合に、反射率が異なる領域の境界付近において誤差が生じたり、焦点ぼけによって誤差が発生する領域が拡大するため、ぼけ度合および対象物の反射率を既知かつ一定なものとし、撮影輝度と誤差の関係から補正関係のテーブルを事前に作成することにより、反射率が異なる領域の境界付近に発生する誤差を低減する方法が開示されている。

10

【 0 0 0 4 】

また、特許文献 2 には、格子投影法を用いて形状計測を行う場合に、反射率が異なる領域の境界付近において誤差が生じたり、焦点ぼけによって誤差が発生する領域が拡大するため、カメラを中心にして対称に配置された二つの格子投影装置を用いることで、反射率が異なる領域の境界付近において生じる誤差を低減する方法が開示されている。

【先行技術文献】

【特許文献】

【 0 0 0 5 】

【特許文献 1】特開 2 0 0 8 - 2 4 1 4 8 3 号公報

【特許文献 2】特開 2 0 0 9 - 2 6 4 8 6 2 号公報

20

【非特許文献】

【 0 0 0 6 】

【非特許文献 1】松本真吾，藤垣元治，梶谷明大，全空間テーブル化手法による鏡を用いた複数方向からの三次元形状計測，応力・ひずみ測定と強度評価シンポジウム講演論文集，42(2011)，191-196。

【発明の概要】

【発明が解決しようとする課題】

【 0 0 0 7 】

背景技術で説明した先行技術文献に開示された技術では次のような問題点がある。非特許文献 1 に開示される技術では、ハレーションや自己隠蔽による影響を回避することが出来るが、反射率が異なる領域の境界付近に発生する誤差に関しては対応できない。特許文献 1 に開示される技術では、均一な焦点ぼけにしか対応できないため、平面以外の計測対象物に適用することは困難である。二つの格子投影装置による計測結果を単なる平均化により合成するため、平行な光線を投影可能な格子投影装置を対称に配置しなければ、高い精度での計測が期待できない。

30

【 0 0 0 8 】

そこで、本発明の目的は、上記従来技術の問題点に鑑み、格子投影法での計測において、反射率が異なる領域の境界付近に発生する誤差を低減することが可能な物体表面の反射率の変化に対する三次元計測誤差低減方法とその装置を提供することである。

【課題を解決するための手段】

40

【 0 0 0 9 】

本願の請求項 1 に係る発明は、

物体表面の反射率の変化に対する三次元計測誤差の低減を行なう三次元計測方法であって、

カメラと、カメラの周囲に設置した複数の格子投影装置を用いて、各画素において重みを予め求めておき、前記予め求められた重みを元にして前記各格子投影装置を用いて得られた前記物体表面の高さ情報の重み付け平均を画素ごとに行う三次元計測方法である。

請求項 2 に係る発明は、

物体表面の反射率の変化に対する三次元計測誤差の低減を行なう三次元計測方法であって、

50

カメラと、前記カメラの周囲に設置した複数の格子投影装置を用いて、各画素において重みを予め求めておき、前記予め求められた重みを元にして前記各格子投影装置を用いて得られた前記物体表面の空間座標情報の重み付け平均を画素ごとに行う三次元計測方法である。

【発明の効果】

【0010】

本発明によれば、異なる反射率の境界付近に発生する誤差を低減可能で、異なる材質の境界付近に発生する誤差を低減可能で、段差部の境界付近に発生する誤差を低減可能な物体表面の反射率の変化に対する三次元計測誤差低減方法とその装置を提供できる。

【図面の簡単な説明】

【0011】

【図1】格子投映法に位相シフト法を組み合わせた計測手法において計測誤差が生じることを示す図である。

【図2】室内光の下で試料を撮影した画像と計測結果を比較して示す図である。

【図3】1ラインの輝度部分分布と計測結果の比較を示す図である。

【図4】異なる反射率のパターンを持つ試料を示す図である。

【図5】異なる反射率領域の境界付近の位相解析結果を示す図である。

【図6】図5の線Aにおける輝度と位相の比較を示す図である。

【図7】反射率と位相の関係を示す図である。

【図8】画素の視野角とレンズの焦点ぼけを示す図である。

【図9】空間分解の変化の影響を平滑化により再現することを示す図である。

【図10】複数の振幅を持つ位相の和を示す図である。

【図11】位相とz座標の関係を示す図である。

【図12】カメラ1台と格子投影装置2台の配置例を示す図である。

【図13】真値と計測結果と計測誤差の関係の例を示す図である。

【図14】基準面を用いた x と z の取得を示す図である。

【図15】投影格子の位相の画素に対する傾きを示す図である。

【図16】ある画素での投影格子の位相の z 座標に対する傾きを示す図である。

【図17】カメラが中央にある場合を示す図である。

【図18】カメラが中央にない場合を示す図である。

【図19】格子投影装置が3台ある場合を示す図である。

【図20】本発明に係る実験に用いる実験形状計測装置を示す図である。

【図21】計測試料を示す図である。

【図22】本実験における計測条件を示す図である。

【図23】算出した x 分布画像を示す図である。

【図24】算出した z 分布画像を示す図である。

【図25】算出した重み W_1 と W_2 の分布画像を示す図である。

【図26】線A部の重み W_1 と W_2 の分布を示す図である。

【図27】格子投影画像を示す図である。

【図28】計測結果を示す図である。

【図29】合成結果の比較を示す図である。

【図30】合成前後の計測結果の比較を示す図である。

【図31】比較結果を示す図である。

【図32】実験形状計測装置を示す図である。

【図33】計測試料を示す図である。

【図34】計測結果を示す図である。

【図35】重み分布を示す図である。

【図36】合成結果を示す図である。

【図37】合成結果の計測結果の比較を示す図である。

【発明を実施するための形態】

10

20

30

40

50

【 0 0 1 2 】

以下、本発明の実施形態を図面とともに説明する。

1 反射率による計測誤差

ここでは、本発明により低減を可能とした異なる反射率の境界付近に生じる誤差について述べる。まず1 - 1節では、反射率分布と計測誤差の関係を述べる。次に1 - 2節では、位相シフト法による位相解析結果が周辺の反射率分布から受ける影響について述べる。そして1 - 3節では、この誤差が周辺との反射率の差に起因することから、誤差の要因をカメラの空間分解能による影響から考察する。

【 0 0 1 3 】

1 - 1 計測誤差

格子投映法に位相シフト法を組み合わせた計測手法では、これまで誤差が生じる場面が存在した。その一例を図1に示す。図1(a)は平面状の計測試料であり、図1(b)はこれを計測した結果を立体的に表示したものである。図1(b)を見ると、計測結果に試料の様子が浮き出ていることが分かる。

【 0 0 1 4 】

ここで、この誤差の生じている画素の位置に着目する。この試料を白色の室内光の下で撮影し、計測結果の高さ分布画像と比較した。これを図2に示す。これより1ラインのデータを抜き出し、比較したものが図3である。図3より、模様により生じる反射率の変化の境界位置と計測誤差の位置が対応していることが分かる。このような計測誤差は、汚れなどの影響でも生じるため、品質検査の分野にて欠陥の誤検出に繋がる恐れもある。

【 0 0 1 5 】

1 - 2 位相解析結果と反射率分布の関係

位相シフト法を用いた格子画像の解析では、背景光の影響を受けることなく、画素ごとに独立した位相値を算出することができる。周辺画素を参照する必要がないため、不連続な物体の計測も可能である。しかし、1 - 1節で述べたように、物体の模様など、反射率の異なる領域の境界付近では、周辺との反射率の差による位相解析結果への影響が存在する。

【 0 0 1 6 】

計測試料の反射率により、位相解析結果が受ける影響を確認する。図4に異なる反射率のパターンを持つ試料を示す。この試料に格子パターンを投影し位相解析を行う。解析を行った結果を図5に示す。図5の線Aと線Bより抜き出した反射率の分布と位相分布の比較を図6へ示す。図6より、反射率の異なる領域の境界付近において、位相パターンは不規則な変化を示す。これより、位相解析結果が周辺の反射率分布から影響を受けていることが分かる。

【 0 0 1 7 】

1 - 3 誤差の要因

1 - 2節より、周辺領域との反射率の差が生じる部分に誤差が生じることが確認できた。しかし、位相シフト法を用いた位相解析では、周辺画素を参照することなく、画素ごとに独立した位相値の算出が可能である。そのため、位相解析の段階では、このような周辺からの影響を受けることは考えられない。したがって、誤差の要因として、格子画像撮影時のカメラの空間分解能が考えられる。

【 0 0 1 8 】

カメラの空間分解能を決定する要素としては、レンズの焦点ぼけや1画素の視野角の大きさがある。これを図7に示す。まず、カメラの各画素には視野角が存在し、完全な点を撮影することは出来ない。一方で、焦点ぼけが生じた場合、1画素の視野角は、さらに大きくなる。これらによるカメラの空間分解能の変化は、計測精度に大きな影響を与えると考えられる。

【 0 0 1 9 】

2 反射率分布と空間分解能による誤差量の導出

ここでは、異なる反射率の境界付近に生じる誤差を導出する。まず2 - 1節では、反射

10

20

30

40

50

率分布と空間分解能による影響を検討し、位相誤差を一般式に表す。次に 2 - 2 節では、前節で求めた位相誤差を計測誤差に換算する方法について述べる。

【 0 0 2 0 】

2 - 1 位相誤差の導出

2 - 1 - 1 3要素の平滑化による影響

反射率の境界付近における誤差量について、反射率の差と位相変化量の関係を導出する。まず、振幅を A_x 、バイアスを B_x とした場合、4回シフト時の輝度変化は数1式から数4式のように示される。

【 0 0 2 1 】

【数1】

$$I_0(x) = A_x \cos(\theta(x)) + B_x$$

【 0 0 2 2 】

【数2】

$$I_1(x) = A_x \cos\left(\theta(x) + \frac{\pi}{2}\right) + B_x$$

【 0 0 2 3 】

【数3】

$$I_2(x) = A_x \cos(\theta(x) + \pi) + B_x$$

【 0 0 2 4 】

【数4】

$$I_3(x) = A_x \cos\left(\theta(x) + \frac{3\pi}{2}\right) + B_x$$

【 0 0 2 5 】

次に、空間分解能の関係から、周辺輝度の影響を受けた場合を3輝度の平滑化として考える。図9は空間分解の変化の影響を平滑化により再現することを示す図である。間隔で初期位相のずれた周辺輝度値の影響を考慮すると、シフト時の輝度変化は数5式～数8式のように示される。

【 0 0 2 6 】

【数5】

$$I'_0(x) = A_{x-1} \cos(\theta(x) - \Delta\theta) + B_{x-1} + A_x \cos(\theta(x)) + B_x \\ + A_{x+1} \cos(\theta(x) + \Delta\theta) + B_{x+1}$$

【 0 0 2 7 】

【数6】

$$I'_1(x) = A_{x-1} \cos\left(\theta(x) + \frac{\pi}{2} - \Delta\theta\right) + B_{x-1} + A_x \cos\left(\theta(x) + \frac{\pi}{2}\right) + B_x \\ + A_{x+1} \cos\left(\theta(x) + \frac{\pi}{2} + \Delta\theta\right) + B_{x+1}$$

【 0 0 2 8 】

【数7】

$$I'_2(x) = A_{x-1} \cos(\theta(x) + \pi - \Delta\theta) + B_{x-1} + A_x \cos(\theta(x) + \pi) + B_x \\ + A_{x+1} \cos(\theta(x) + \pi + \Delta\theta) + B_{x+1}$$

【 0 0 2 9 】

【数 8】

$$I_3'(x) = A_{x-1} \cos\left(\theta(x) + \frac{3\pi}{2} - \Delta\theta\right) + B_{x-1} + A_x \cos\left(\theta(x) + \frac{3\pi}{2}\right) + B_x \\ + A_{x+1} \cos\left(\theta(x) + \frac{3\pi}{2} + \Delta\theta\right) + B_{x+1}$$

【0030】

このとき数 5 式～数 8 式より、位相シフト法を用いると数 9 式が得られる。

【0031】

10

【数 9】

$$\theta'(x) = \tan^{-1}\left(\frac{I_3'(x) - I_1'(x)}{I_2'(x) - I_0'(x)}\right) \\ = \tan^{-1}\left(\frac{A_{x-1} \sin(\theta(x) - \Delta\theta) + A_x \sin(\theta(x)) + A_{x+1} \sin(\theta(x) + \Delta\theta)}{A_{x-1} \cos(\theta(x) - \Delta\theta) + A_x \cos(\theta(x)) + A_{x+1} \cos(\theta(x) + \Delta\theta)}\right)$$

【0032】

これを複素平面上に図示すと、図 10 となる。 $\theta'(x)$ とは、振幅が A_{x-1}, A_x, A_{x+1} 、位相が $(x) \cdots, (x), (x) + \cdots$ の複素ベクトルを平均した時の位相である。

20

また、ここで位相誤差量を $\epsilon(x)$ とすると数 10 式が成り立つ。

【0033】

【数 10】

$$\theta_E(x) = \tan^{-1}\left(\frac{A_{x-1} \sin(\theta(x) - \Delta\theta) + A_x \sin(\theta(x)) + A_{x+1} \sin(\theta(x) + \Delta\theta)}{A_{x-1} \cos(\theta(x) - \Delta\theta) + A_x \cos(\theta(x)) + A_{x+1} \cos(\theta(x) + \Delta\theta)}\right) - \tan^{-1}\left(\frac{\sin(\theta(x))}{\cos(\theta(x))}\right) \\ = \tan^{-1}\left(\frac{A_{x+1} \sin(\Delta\theta) - A_{x-1} \sin(\Delta\theta)}{A_{x-1} \cos(\Delta\theta) + A_x + A_{x+1} \cos(\Delta\theta)}\right)$$

【0034】

30

このとき、各要素の間隔が十分に小さくであるとすると、数 11 式が成り立つ。

【0035】

【数 11】

$$\theta_E(x) = \tan^{-1}\left(\frac{A_{x+1} - A_{x-1}}{A_{x-1} + A_x + A_{x+1}} \Delta\theta\right)$$

【0036】

また、数 12 式がなりたつ。

【0037】

【数 12】

40

$$-1 < \frac{A_{x+1} - A_{x-1}}{A_{x-1} + A_x + A_{x+1}} < 1 \quad , \quad \text{よ} \text{り} \quad , \quad \frac{A_{x+1} - A_{x-1}}{A_{x-1} + A_x + A_{x+1}} \Delta\theta \cong 0 \quad \text{であるので} \text{、}$$

$$\theta_E(x) \cong \frac{A_{x+1} - A_{x-1}}{A_{x-1} + A_x + A_{x+1}} \Delta\theta$$

【0038】

このことから、位相誤差量 $\epsilon(x)$ は、元の位相値 (x) に関係なく、各要素間の位相差

の大きさに比例することが分かる。つまり、今回導出した位相誤差量は、元の位相値を 50

問わず、投影格子のピッチサイズに反比例し、格子が細かいほど大きくなる。

【 0 0 3 9 】

2 - 1 - 2 n要素の平滑化による影響

最後に、n個の要素(nは奇数)の場合の位相誤差量 $\varepsilon_n(x)$ を求め、位相誤差を表す一般式とする。異なる振幅を持つn個の位相の和を考えると数 1 3 式となる。

【 0 0 4 0 】

【数 1 3】

$$\theta'_n(x) = \tan^{-1} \left(\frac{\sum_{k=-\frac{n-1}{2}}^{\frac{n+1}{2}} A_{x+k} \sin(\theta(x) + k\Delta\theta)}{\sum_{k=-\frac{n-1}{2}}^{\frac{n+1}{2}} A_{x+k} \cos(\theta(x) + k\Delta\theta)} \right)$$

【 0 0 4 1 】

よって、位相誤差量 $\varepsilon_n(x)$ は数 1 4 式となる。

【 0 0 4 2 】

【数 1 4】

$$\theta_{En}(x) = \tan^{-1} \left(\frac{\sum_{k=-\frac{n-1}{2}}^{\frac{n+1}{2}} A_{x+k} \sin(\theta(x) + k\Delta\theta)}{\sum_{k=-\frac{n-1}{2}}^{\frac{n+1}{2}} A_{x+k} \cos(\theta(x) + k\Delta\theta)} \right) - \tan^{-1} \left(\frac{\sin(\theta(x))}{\cos(\theta(x))} \right)$$

【 0 0 4 3 】

ここで数 1 2 式より、位相誤差量 $\varepsilon_n(x)$ は、元の位相値 $\theta(x)$ に依存しないので、 $\theta(x) = 0$ とすると数 1 5 式が成り立つ。

【 0 0 4 4 】

【数 1 5】

$$\theta_{En}(x) = \tan^{-1} \left(\frac{\sum_{k=-\frac{n-1}{2}}^{\frac{n+1}{2}} A_{x+k} \sin(k\Delta\theta)}{\sum_{k=-\frac{n-1}{2}}^{\frac{n+1}{2}} A_{x+k} \cos(k\Delta\theta)} \right)$$

【 0 0 4 5 】

このとき、各要素の間隔が十分に小さく $\Delta\theta$ が略 0 に等しいとすると数 1 6 式が成り立つ。

【 0 0 4 6 】

【数 1 6】

$$\theta_{En}(x) = \tan^{-1} \left(\frac{\sum_{k=-\frac{n-1}{2}}^{\frac{n+1}{2}} k A_{x+k}}{\sum_{k=-\frac{n-1}{2}}^{\frac{n+1}{2}} A_{x+k}} \Delta\theta \right)$$

【0 0 4 7】

また、数 1 7 式も成り立つ。

【0 0 4 8】

【数 1 7】

$$-1 < \frac{\sum_{k=-\frac{n-1}{2}}^{\frac{n+1}{2}} k A_{x+k}}{\sum_{k=-\frac{n-1}{2}}^{\frac{n+1}{2}} A_{x+k}} < 1 \quad , \quad \text{よ} \ddot{\text{り}} , \quad \frac{\sum_{k=-\frac{n-1}{2}}^{\frac{n+1}{2}} k A_{x+k}}{\sum_{k=-\frac{n-1}{2}}^{\frac{n+1}{2}} A_{x+k}} \Delta\theta \cong 0$$

$$\theta_{En}(x) = \frac{\sum_{k=-\frac{n-1}{2}}^{\frac{n+1}{2}} k A_{x+k}}{\sum_{k=-\frac{n-1}{2}}^{\frac{n+1}{2}} A_{x+k}} \Delta\theta$$

【0 0 4 9】

さらに、各要素間の位相差に対する位相誤差の比例係数を $E_n(x)$ とすると数 1 8 式、数 1 9 が成り立つ。

【0 0 5 0】

【数 1 8】

$$E_n(x) \cong \frac{\sum_{k=-\frac{n-1}{2}}^{\frac{n+1}{2}} k A_{x+k}}{\sum_{k=-\frac{n-1}{2}}^{\frac{n+1}{2}} A_{x+k}}$$

【0 0 5 1】

【数 1 9】

$$\theta_{En}(x) \cong E_n(x) \Delta\theta$$

【0 0 5 2】

E_n は、カメラの空間分解能と計測対象物上の振幅分布により変化する係数である。一方で、 $\theta_{En}(x)$ は各要素間の位相差、つまり投影格子の位相の傾きを意味する。 E_n は、投影格子の位相の傾き $\theta_{En}(x)$ から位相誤差 $\Delta\theta$ を求める係数であり、ここでは位相誤差係数と呼ぶ。

【 0 0 5 3 】

2 - 2 計測誤差の導出

本節以降、誤差を画素単位で求める。画素単位で考えた場合、投影格子の位相の傾きは、1画素における投影格子位相の傾きとなる。数19式より、画素ごとに位相誤差の導出が行える。また、この式から計測誤差の値を得るには、位相値をz座標値に変換する必要がある。図11に投影格子の位相とz座標値の関係を示す。

【 0 0 5 4 】

投影格子の位相変化の方向は、位相シフトの方向により決定される。今回、位相はx軸の正方向に増加するとした。このとき、視線Lとx軸との交点Pの位相値を θ とすると、視線L上にて格子位相が2 π 変化する点がz軸方向の計測可能範囲 z_{max} となる。ここで、単位位相あたりのz座標の変化量を Δz とすると、計測誤差値 z_e は位相誤差の値 θ_e と Δz の積により得られる。これを数20式に示す。なお、 Δz の値は格子投影装置とカメラの位置関係により異なるため、同じ位相誤差 θ_e でも、計測誤差 z_e の値や符号は変化する。

【 0 0 5 5 】

【数20】

$$\begin{aligned} z_e(i, j) &\cong \theta_{en}(i, j) \times \Delta z(i, j) \\ &\cong E_n(i, j) \times \Delta \theta(i, j) \times \Delta z(i, j) \end{aligned}$$

【 0 0 5 6 】

ただし、数20式における位相誤差係数 E_n を正確に導出するためには、レンズの特性および画素以下の分解能での格子振幅分布の情報が必要となる。しかし、実際の撮影画像からこれらを得ることは難しい。そのため、計測誤差を低減するためには、位相誤差係数 E_n の算出を必要としない方法が必要となる。

【 0 0 5 7 】

3 複数台の格子投影装置による計測誤差の低減

3 - 1 誤差低減原理

本節では、位相誤差係数 E_n を必要としない計測誤差の低減手法について述べる。位相誤差係数 E_n は、カメラと計測対象物の関係により決定される項であるので、格子投影装置の位置を変化させても変化しない。よって、数20式の z_e は、投影格子の位相の傾き θ と、単位位相あたりのz座標の変化量 Δz により決まる。

【 0 0 5 8 】

このことから、計測誤差の低減には、2つ以上の計測結果を利用することが有効であると考えられる。異なる方向から格子投影を行い、得られた複数の計測結果から、誤差を低減する。まず、格子投影装置の配置に影響される θ および Δz を計測前に求める。そして、これらを元に重み付け平均を行い、複数の計測結果を合成することで誤差の低減が実現できる。以下に2台の格子投影装置を用いた場合を例として、誤差低減手法の詳細を示す。

【 0 0 5 9 】

図12のように、1台のカメラと2台の格子投影装置を配置したとする。このとき真値を z とし、それぞれの格子投影装置の真値 z に対する計測結果を z_{n1} と z_{n2} 、それぞれの計測誤差を z_{e1} と z_{e2} とすると、これらの関係は図13となる。このとき、真値をそれぞれの計測結果と計測誤差を用いて表すと、数21式と数22式のように示される。

【 0 0 6 0 】

【数21】

$$\begin{aligned} z(i, j) &\cong z_{m1}(i, j) + z_{e1}(i, j) \\ &\cong z_{m1}(i, j) + E_n(i, j) \times \Delta \theta_1(i, j) \times \Delta z_1(i, j) \end{aligned}$$

【 0 0 6 1 】

10

20

30

40

【数 2 2】

$$z(i, j) \cong z_{m_2}(i, j) + z_{e_2}(i, j) \\ \cong z_{m_2}(i, j) + E_n(i, j) \times \Delta\theta_2(i, j) \times \Delta z_2(i, j)$$

【0 0 6 2】

これらの式からE_nを消去すると数 2 3 式となる。

【0 0 6 3】

【数 2 3】

$$z(i, j) \cong \frac{\Delta\theta_2(i, j)\Delta z_2(i, j)z_{m_1}(i, j) - \Delta\theta_1(i, j)\Delta z_1(i, j)z_{m_2}(i, j)}{\Delta\theta_2(i, j)\Delta z_2(i, j) - \Delta\theta_1(i, j)\Delta z_1(i, j)} \\ = \frac{\Delta\theta_2(i, j)\Delta z_2(i, j)}{\Delta\theta_2(i, j)\Delta z_2(i, j) - \Delta\theta_1(i, j)\Delta z_1(i, j)} z_{m_1}(i, j) \\ + \frac{-\Delta\theta_1(i, j)\Delta z_1(i, j)}{\Delta\theta_2(i, j)\Delta z_2(i, j) - \Delta\theta_1(i, j)\Delta z_1(i, j)} z_{m_2}(i, j)$$

【0 0 6 4】

数 2 3 式より、位相誤差係数E_nを用いることなく、2つの計測結果から真値を得ることができる。これは、各計測結果に対して、重み付け平均を用いた合成を行うことを意味する。数 2 4 式と数 2 5 式に重みの算出式を示す。

20

【0 0 6 5】

【数 2 4】

$$W_1(i, j) = \frac{\Delta\theta_2(i, j)\Delta z_2(i, j)}{\Delta\theta_2(i, j)\Delta z_2(i, j) - \Delta\theta_1(i, j)\Delta z_1(i, j)}$$

【0 0 6 6】

【数 2 5】

$$W_2(i, j) = \frac{-\Delta\theta_1(i, j)\Delta z_1(i, j)}{\Delta\theta_2(i, j)\Delta z_2(i, j) - \Delta\theta_1(i, j)\Delta z_1(i, j)}$$

【0 0 6 7】

このように、本発明に係る合成処理は、投影格子ピッチの差や格子投影装置の位置を重み分布に反映することが出来る。そのため、それぞれの格子投影装置における格子ピッチや計測範囲が異なる計測条件でも、計測結果の合成が可能である。したがって、本発明の方法では、カメラと格子投影装置の厳密な位置合わせを必要としない。

また、z座標の誤差と位相誤差の関係と同様の関係がx、y座標の誤差と位相誤差の関係についても成立する。そのため、この重み付け平均による誤差低減手法は、x、y、z座標（空間座標）についても有効である。

【0 0 6 8】

3 - 2 と z の算出方法

本発明に係る方法には、投影格子の位相の傾き と単位位相あたりのz座標値の変化量 z の算出を必要とする。ここでは、 と z算出方法の1例として、図 1 4 のように平板を基準面として用いる方法を示す。

40

【0 0 6 9】

3 - 2 - 1 投影格子の位相の傾き () の算出

投影格子の位相の傾き は、投影格子の位相の画素に対する傾きであるため、基準面に投影した格子の位相分布に対し数 2 6 式を用いることで算出を行うことができる。図 1 5 は投影格子の位相の画素に対する傾きを示す図である。

【0 0 7 0】

【数 2 6】

$$\Delta\theta(i, j) \cong \frac{\theta(i+1, j) - \theta(i-1, j)}{2}$$

【0 0 7 1】

3 - 2 - 2 単位位相あたりのz座標値の変化量 (z)の算出

単位位相あたりのz座標値の変化量 zは、投影格子の位相のz座標に対する傾きである。そのため、投影した格子の位相分布のz座標方向での変化量から算出を行うことができる。今回は、各z座標位置に配置した基準面を用いて、各画素ごとにz座標と位相の関係を
10
得た。そして、最小二乗法を用いて各画素ごとに近似直線を求め、この直線の傾きの逆数
を用いた。図 1 6 はある画素での投影格子の位相の z 座標に対する傾きを示す図である。
以上のようにして求めた と z を用いることで、数 2 4 式と数 2 5 式より重み W_1 と
 W_2 を求めることができる。

【0 0 7 2】

3 - 3 - 3 3 台以上の格子投影装置を用いた誤差低減

本節では、3 台以上の格子投影装置を用いての誤差低減について述べる。本発明の方法
において、格子投影装置の台数を 3 台以上に増やした場合、数 2 3 式から重みを求めること
ができない。そこで、擬似逆行列を用いて、3 台以上の格子投影装置を用いた場合の重
みの導出を行う。格子投影装置の台数をD台としたとき、各格子投影装置における計測
結果 z_n と計測誤差 z_n および真値 z の関係は、数 2 7 式 ~ 数 2 9 式のように表される。
20

【0 0 7 3】

【数 2 7】

$$\begin{aligned} z(i, j) &\cong z_{m1}(i, j) + z_{e1}(i, j) \\ &\cong z_{m1}(i, j) + E_n(i, j) \times \Delta\theta_1(i, j) \times \Delta z_1(i, j) \end{aligned}$$

【0 0 7 4】

【数 2 8】

$$\begin{aligned} z(i, j) &\cong z_{m2}(i, j) + z_{e2}(i, j) \\ &\cong z_{m2}(i, j) + E_n(i, j) \times \Delta\theta_2(i, j) \times \Delta z_2(i, j) \end{aligned}$$

【0 0 7 5】

【数 2 9】

$$\begin{aligned} z(i, j) &\cong z_{mD}(i, j) + z_{eD}(i, j) \\ &\cong z_{mD}(i, j) + E_n(i, j) \times \Delta\theta_D(i, j) \times \Delta z_D(i, j) \end{aligned}$$

【0 0 7 6】

これを行列式に表すと数 3 0 式で表される。

【0 0 7 7】

【数 3 0】

$$\begin{bmatrix} z_{m1}(i, j) \\ z_{m2}(i, j) \\ \vdots \\ z_{mD}(i, j) \end{bmatrix} \cong \begin{bmatrix} 1 & -\Delta\theta_1(i, j) \times \Delta z_1(i, j) \\ 1 & -\Delta\theta_2(i, j) \times \Delta z_2(i, j) \\ \vdots & \vdots \\ 1 & -\Delta\theta_D(i, j) \times \Delta z_D(i, j) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} z(i, j) \\ E_n(i, j) \end{bmatrix}$$

【0 0 7 8】

ここで各計測結果が含む誤差の比をマトリックスRとすると数 3 1 式で表される。

【0 0 7 9】

【数 3 1】

$$\mathbf{R} = \begin{bmatrix} 1 & -\Delta\theta_1(i, j) \times \Delta z_1(i, j) \\ 1 & -\Delta\theta_2(i, j) \times \Delta z_2(i, j) \\ \vdots & \vdots \\ 1 & -\Delta\theta_D(i, j) \times \Delta z_D(i, j) \end{bmatrix}$$

【0080】

マトリックスRが正則でない場合、Rの擬似逆行列R⁺は数32式で表される。

【0081】

【数32】

$$\mathbf{R}^+ = (\mathbf{R}^T \mathbf{R})^{-1} \mathbf{R}^T = \begin{bmatrix} W_{11} & W_{12} & \cdots & W_{1D} \\ W_{21} & W_{22} & \cdots & W_{2D} \end{bmatrix}$$

【0082】

数32式を用いることで、数30式は数33式のように変形することができる。

【0083】

【数33】

$$\begin{bmatrix} z(i, j) \\ E_n(i, j) \end{bmatrix} = \mathbf{R}^+ \begin{bmatrix} z_{m1}(i, j) \\ z_{m2}(i, j) \\ \vdots \\ z_{mD}(i, j) \end{bmatrix}$$

【0084】

上式から、3台以上の格子投影装置を用いての誤差低減における合成式を数34式のように求めることができる。

【0085】

【数34】

$$z(i, j) = W_{11}z_{m1}(i, j) + W_{12}z_{m2}(i, j) + \cdots + W_{1D}z_{mD}(i, j)$$

【0086】

3 - 4 格子投影装置の配置例

本発明の方法は、複数台の格子投影装置の配置を重みに反映することができるため、様々な配置で誤差の低減を行う事ができる。ここでは、想定されるカメラと格子投影装置の配置の例を示す。図17はカメラが中央にある場合を示す図である。図18はカメラが中央にない場合を示す図である。図19は格子投影装置が3台ある場合を示す図である。

【0087】

4 誤差低減実験

4 - 1 平面試料の計測

本節では、2台の格子投影装置を用いた形状計測装置により、異なる反射率の境界付近に生じる計測誤差の低減を行う。本実験に用いる実験形状計測装置を図20、計測試料を図21に示す。今回は、2台の格子投影装置からの投影格子が異なる条件下での計測を行うため、格子投影装置の角度に左右で変化をつけた。本実験における計測条件を図22に示す。なお、z軸方向の平均計測範囲は、Projector 1で9.7mmであり、Projector 2で16.9mmである。

【0088】

計測結果の合成を行うには、合成時に用いる z の値を得る必要がある。これらには、位相とz座標の対応関係を得るキャリブレーションの際に撮影した画像を利用する。今回は、図22に示したように、キャリブレーションでは51枚の基準面位相分布の画

像を得ている。

【0089】

まず、キャリブレーション結果から51枚の分布画像を得る。前章と同様に数35式を用いると、投影格子の位相の傾きの分布画像が得られる。得られたの分布画像51枚に対し、平均化を行い1枚の画像とする。さらに最小二乗法を用いた平滑化処理により、ノイズ低減を行う。この結果を図23に示す。

【0090】

【数35】

$$\Delta\theta(i) \cong \frac{\theta(i+1) - \theta(i-1)}{2}$$

次に、z分布の算出を行う。z分布は、最小二乗法を用いて、キャリブレーションデータにおけるz座標軸方向の位相変化を求めることにより得られる。この結果を図24に示す。

【0091】

そして、図23と図24の画像から、数24式と数25式を用いることにより合成に用いる重み分布を得た。これを図25に示す。図25は算出した重み W_1 と W_2 の分布画像を示す図である。また、図25から線A部のデータを抜き出し比較したものを図26に示す。これより、2台の格子投影装置にて、重み付けが異なることが分かる。

【0092】

それぞれの格子投影装置を用いて、図25の試料の計測を行い、算出した重み分布を用いて重み付け平均により合成を行った。今回、行った計測実験における投影格子の画像を図27に、計測結果を図28に示す。この結果を用いて、提案手法の重み付け平均による合成と、従来手法である単純平均による合成を比較した。単純平均による合成結果を図29(a)に、重み付け平均による合成結果を図29(b)に示す。

【0093】

線Bのデータを抜き出し、合成による誤差低減を確認した。これを図30に示す。単純平均による合成では誤差が残る部分が生じたが、重み付け平均による合成では生じなかった。また、このグラフから $i=326$ における値を抜き出し、合成方法による計測精度の変化を確認した。なお真値は、最小二乗法を用いた直線近似により求め6.007mmとした。このとき、誤差の影響を受けない直線とするため、誤差付近の10画素の値は用いなかった。図30から1ラインの値を抜き出し、比較した結果を図31に示す。

【0094】

図31から、本発明の有効性を確認できる。計測誤差は、Projector 1単体の場合に0.257mmであったが、本発明を用いた重み付け平均による合成を行うことで、0.030mmに低減できた。一方で、単純平均した場合の計測誤差は、0.056mmであった。本発明による合成結果は、単純平均による合成結果の約半分まで、計測誤差を低減することができた。したがって、本手法を用いた誤差低減は、異なる反射率の境界部に生じる誤差に対して、有効であると言える。

【0095】

4-2 電子基板の計測

2台の格子投影装置を用いた計測装置を用いて、本発明による計測誤差の低減を試みた。実験に用いた装置を図32へ、計測試料とした電子基板を図33へ示す。この基板の黒いチップ上の白文字による計測結果への影響を誤差低減の前後で比較した。それぞれの格子投影装置による計測結果を図34へ示す。また、合成に用いた重み分布を図35、合成結果を図36へ示す。合成前後の計測結果よりLine Aのデータを抜き出し、これを比較したものを図37へ示す。計測誤差により生じていたばらつきが低減されたことが分かる。

【符号の説明】

【0096】

1 投射装置

20

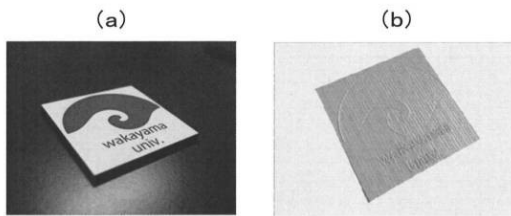
30

40

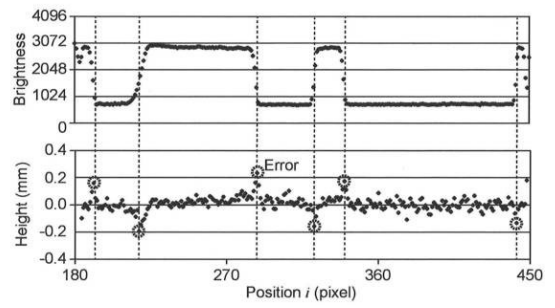
50

2 投射装置

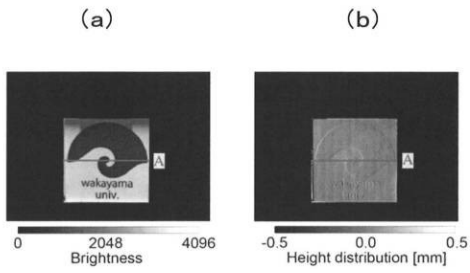
【図 1】



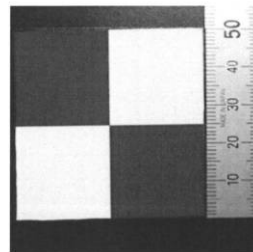
【図 3】



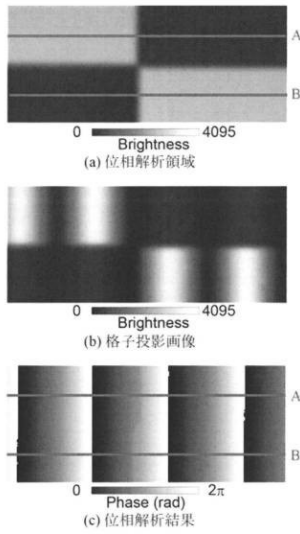
【図 2】



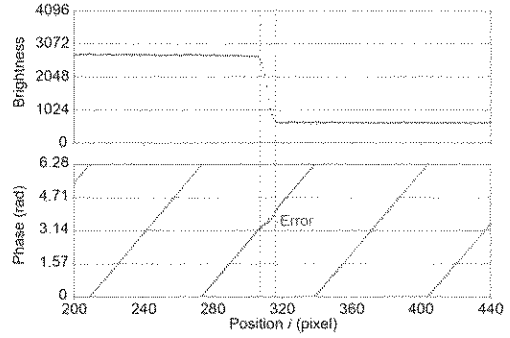
【図 4】



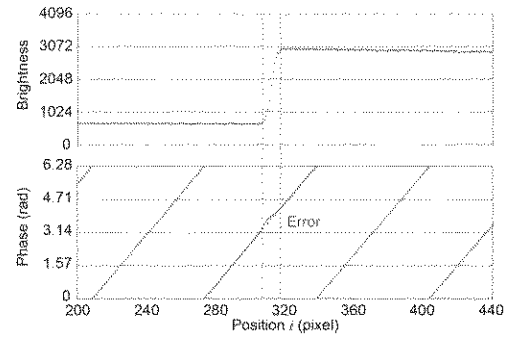
【 図 5 】



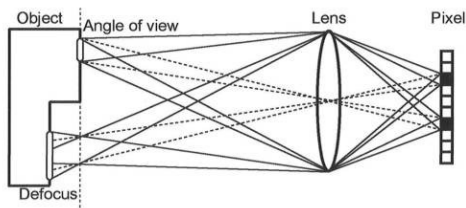
【 図 6 】



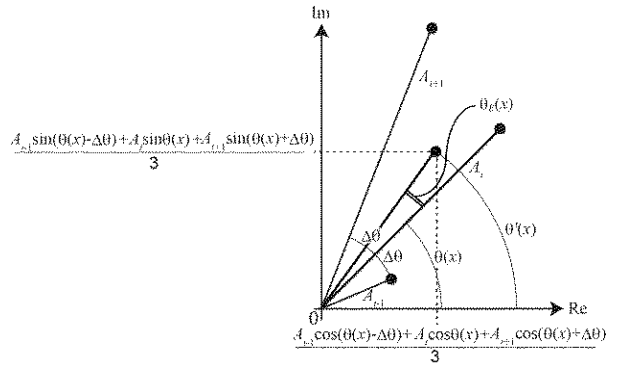
【 図 7 】



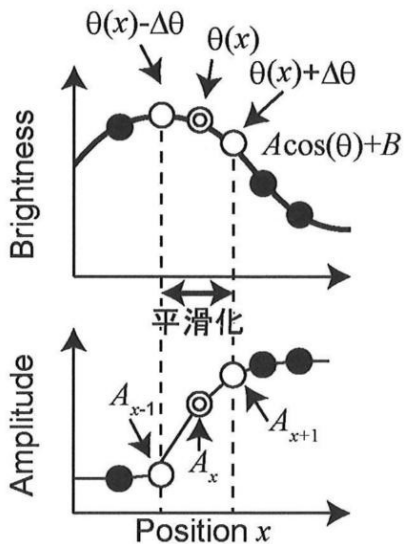
【 図 8 】



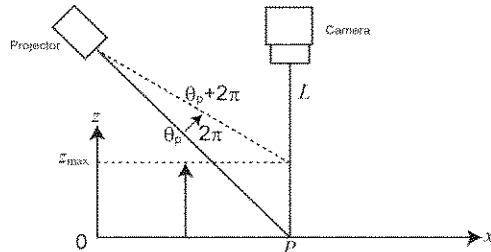
【 図 10 】



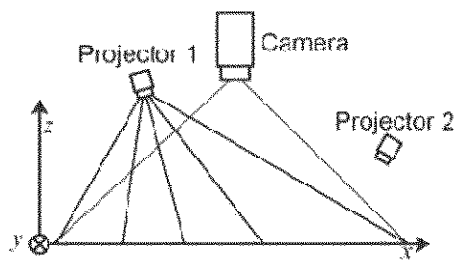
【 図 9 】



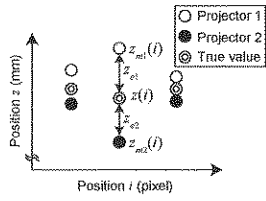
【 図 11 】



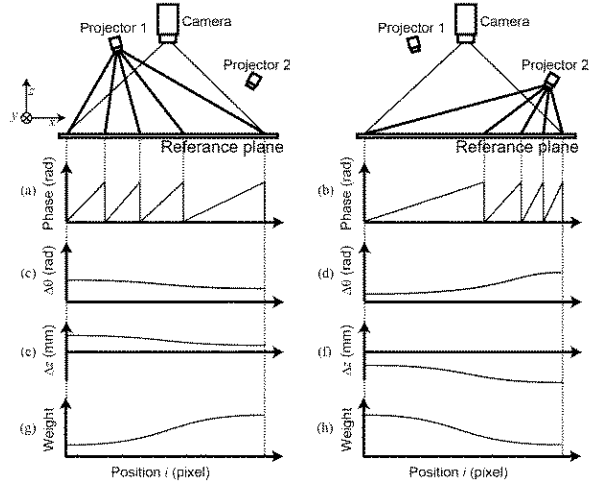
【 図 1 2 】



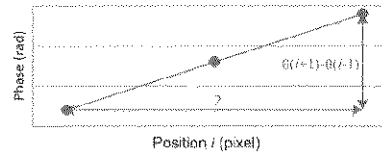
【 図 1 3 】



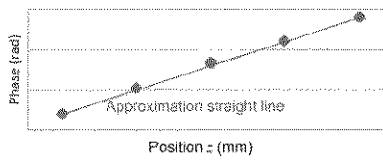
【 図 1 4 】



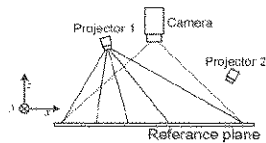
【 図 1 5 】



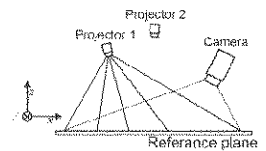
【 図 1 6 】



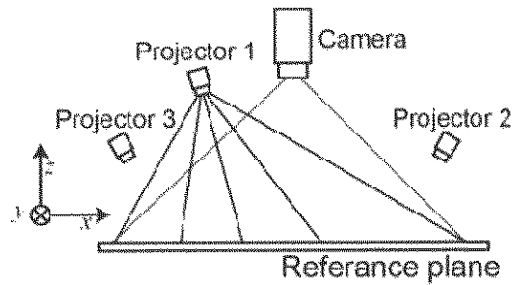
【 図 1 7 】



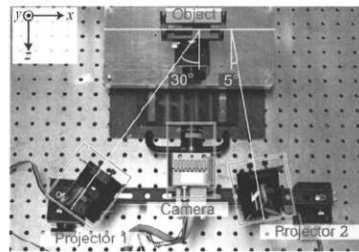
【 図 1 8 】



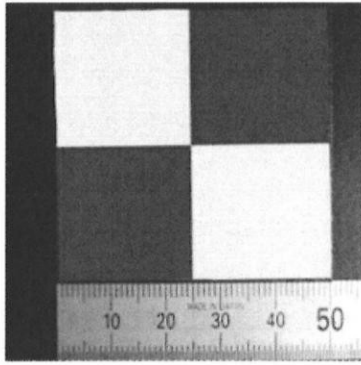
【 図 1 9 】



【 図 2 0 】



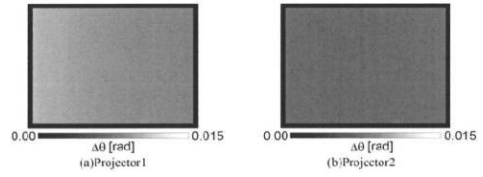
【 図 2 1 】



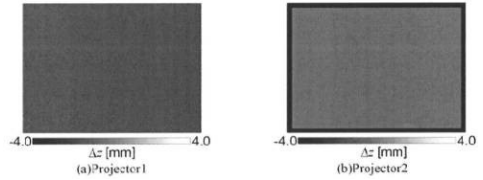
【 図 2 2 】

Shift number (times)	4
Reference plane number (page)	51
Reference plane distance (μm)	-40
Image averaging number (page)	16
Table element number (piece)	6500
Table width (pixel)	640
Table height (pixel)	480

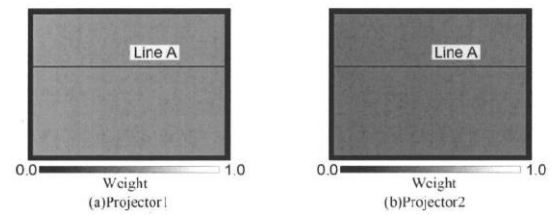
【 図 2 3 】



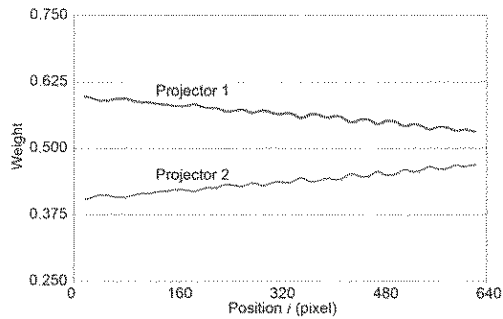
【 図 2 4 】



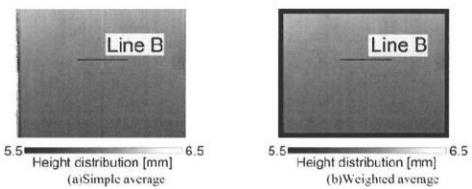
【 図 2 5 】



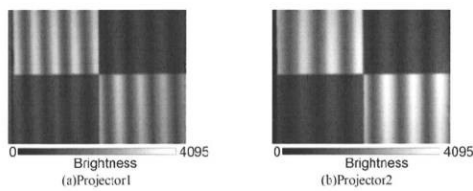
【 図 2 6 】



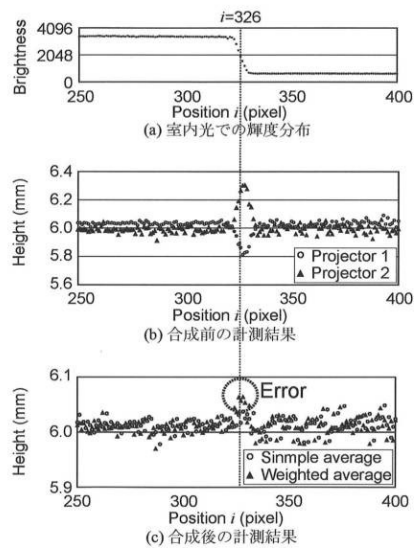
【 図 2 9 】



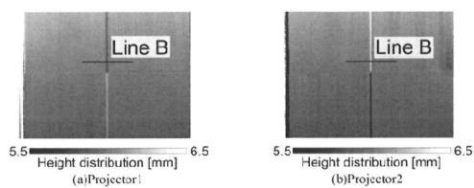
【 図 2 7 】



【 図 3 0 】



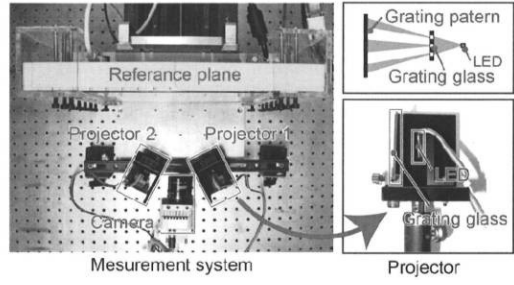
【 図 2 8 】



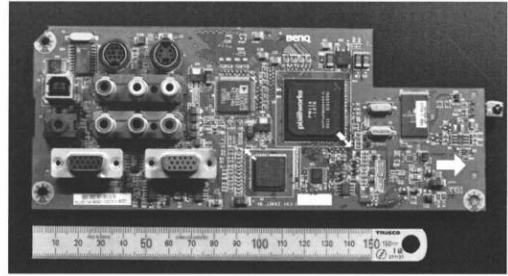
【 図 3 1 】

	Composite result	
	Sample average	Weighted average
Measurement result	6.063	6.037
Error	0.056	0.030
Projector 1	6.264	0.257
Projector 2	5.862	0.145

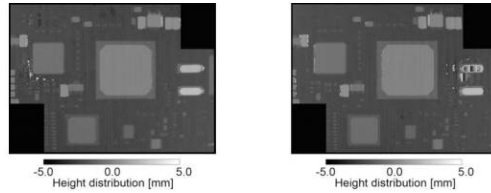
【 図 3 2 】



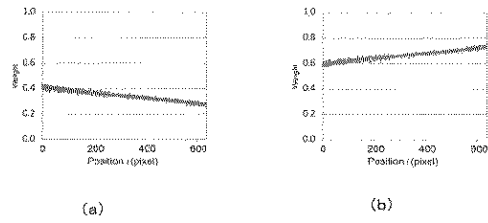
【 図 3 3 】



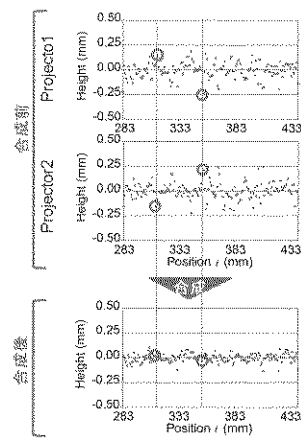
【 図 3 4 】



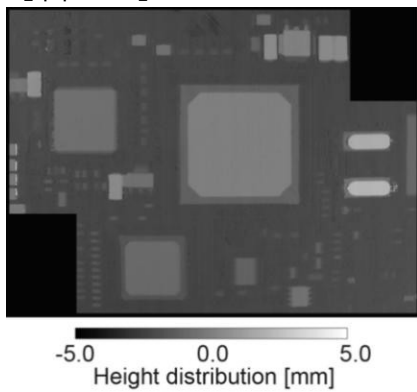
【 図 3 5 】



【 図 3 7 】



【 図 3 6 】



 フロントページの続き

特許法第30条第2項適用 平成25年9月14日関西大学において開催された2013年度精密工学会秋季大会、平成25年11月27日RCC文化センターにおいて開催された平成25年度一般社団法人日本非破壊検査協会秋季講演大会、平成25年12月4日パシフィコ横浜において開催された第23回三次元工学シンポジウム、平成26年2月7日大田区産業プラザ(PiO)において開催された株式会社情報機構「非接触三次元計測技術の基礎と高速化・高精度化・小型化技術」セミナー、平成26年2月12日和歌山大学において開催された平成25年度知的計測クラスターの修士論文発表会で発表

前置審査

(56)参考文献 特開2010-271316(JP,A)
 特開2009-264862(JP,A)
 特開2001-012925(JP,A)

(58)調査した分野(Int.Cl., DB名)

G01B	11/00	-	G01B	11/30
G06T	1/00	-	G06T	1/40
G06T	3/00	-	G06T	5/50
G06T	9/00	-	G06T	9/40