

(19) 日本国特許庁(JP)

## (12) 特許公報(B2)

(11) 特許番号

特許第6041513号  
(P6041513)

(45) 発行日 平成28年12月7日(2016.12.7)

(24) 登録日 平成28年11月18日(2016.11.18)

(51) Int.Cl.

G01B 11/25 (2006.01)  
G06T 1/00 (2006.01)

F 1

G01B 11/25  
G06T 1/00H  
315

請求項の数 11 (全 17 頁)

(21) 出願番号 特願2012-84909 (P2012-84909)  
 (22) 出願日 平成24年4月3日 (2012.4.3)  
 (65) 公開番号 特開2013-213769 (P2013-213769A)  
 (43) 公開日 平成25年10月17日 (2013.10.17)  
 審査請求日 平成27年4月2日 (2015.4.2)

(73) 特許権者 000001007  
 キヤノン株式会社  
 東京都大田区下丸子3丁目30番2号  
 (74) 代理人 100090273  
 弁理士 國分 孝悦  
 (72) 発明者 小竹 大輔  
 東京都大田区下丸子3丁目30番2号 キ  
 ャノン株式会社内

審査官 ▲うし▼田 真悟

最終頁に続く

(54) 【発明の名称】画像処理装置、画像処理方法及びプログラム

## (57) 【特許請求の範囲】

## 【請求項 1】

投影装置により所定の方向のみに輝度値が変化するパターンが投影された状態で撮像装置により撮像された計測対象物の画像データを入力する入力手段と、

前記入力された画像に基づいて、前記計測対象物の画像データ上における二次元座標( $x'_c, y'_c$ )と、前記パターンの画像データ上における一次元座標( $y_p$ )とを対応付ける対応付け手段と、

前記撮像装置のレンズによる歪みを表すモデルに基づき前記計測対象物の画像データにおける二次元座標( $x'_c, y'_c$ )を補正することにより、二次元座標( $x_c, y_c$ )を取得する第1の取得手段と、

前記撮像装置の視点と前記取得された二次元座標( $x_c, y_c$ )とを通る第1の視線ベクトルを導出する第1の視線ベクトル導出手段と、

前記パターンの画像データに三次元座標を投影する処理を行わずに、パターンの画像データ上における一次元座標( $y_p$ )と、前記投影装置のレンズによる歪を表すモデルと、前記撮像装置と前記投影装置の間のエピポーラ拘束とに基づいて、前記パターンの画像データ上における二次元座標( $x'_p, y'_p$ )を取得する第2の取得手段と、

前記投影装置の視点と前記取得された二次元座標( $x'_p, y'_p$ )とを通る第2の視線ベクトルを導出する第2の視線ベクトル導出手段と、

前記第1の視線ベクトルと、前記第2の視線ベクトルとの3次元空間における交点の座標を導出する座標導出手段と

10

20

を有することを特徴とする画像処理装置。

**【請求項 2】**

前記第1の取得手段は、前記撮像装置のレンズによる歪みの影響が除去されるように、前記二次元座標( $x'_c, y'_c$ )を補正することにより、前記二次元座標( $x_c, y_c$ )を取得し、

前記第2の取得手段は、前記投影装置のレンズによる歪みの影響が加わるように、前記一次元座標( $y_p$ )を補正することにより、前記二次元座標( $x'_p, y'_p$ )を取得することを特徴とする請求項1に記載の画像処理装置。

**【請求項 3】**

前記投影装置のレンズによる歪みを表すモデルの式は、以下の式(1)であり、前記エピポーラ拘束を表す式は以下の式(2)であり、

前記第2の取得手段は、式(1)、式(2)を連立させて解くことにより、前記パターンの画像データ上における二次元座標( $x'_p, y'_p$ )を取得することを特徴とする請求項1又は2に記載の画像処理装置。

**【数1】**

$$y_p' = y_p' \{1 + k_{p1}(x_p'^2 + y_p'^2) + k_{p2}(x_p'^2 + y_p'^2)^2\} + p_{p1}(x_p'^2 + 3y_p'^2) + 2p_{p2}x_p'y_p'$$

・・・(1)

**【数2】**

$$\begin{bmatrix} x_c & y_c & 1 \end{bmatrix} \mathbf{E} \begin{bmatrix} x_p' \\ y_p' \\ 1 \end{bmatrix} = 0$$

・・・(2)

**【請求項 4】**

前記第2の取得手段は、前記投影装置の視点と前記パターンの画像データ上における二次元座標( $x'_p, y'_p$ )とが前記第1の視線ベクトルと三次元空間の一点で交わるよう前に前記パターンの画像データ上における二次元座標( $x'_p, y'_p$ )を取得することを特徴とする請求項1乃至3の何れか1項に記載の画像処理装置。

**【請求項 5】**

前記パターンは、縞状パターンであることを特徴とする請求項1乃至4の何れか1項に記載の画像処理装置。

**【請求項 6】**

前記縞状パターンにおける縞の方向は、前記縞状パターンの画像データにおける水平方向又は垂直方向であることを特徴とする請求項5に記載の画像処理装置。

**【請求項 7】**

前記パターンは、ライン状パターンであることを特徴とする請求項1乃至4の何れか1項に記載の画像処理装置。

**【請求項 8】**

前記ライン状パターンにおけるラインの方向は、前記ライン状パターンの画像データにおける水平方向又は垂直方向であることを特徴とする請求項7に記載の画像処理装置。

**【請求項 9】**

前記パターンの画像データは、空間コード化法又は位相シフト法に使用される画像データであることを特徴とする請求項1乃至8の何れか1項に記載の画像処理装置。

**【請求項 10】**

画像処理装置によって実行される画像処理方法であって、  
投影装置により所定の方向のみに輝度値が変化するパターンが投影された状態で撮像裝

10

20

30

40

50

置により撮像された計測対象物の画像データを入力する入力ステップと、

前記入力された画像に基づいて、前記計測対象物の画像データ上における二次元座標（ $x'_c, y'_c$ ）と、前記パターンの画像データ上における一次元座標（ $y_p$ ）とを対応付ける対応付けステップと、

前記撮像装置のレンズによる歪みを表すモデルに基づき前記計測対象物の画像データにおける二次元座標（ $x'_c, y'_c$ ）を補正することにより、二次元座標（ $x_c, y_c$ ）を取得する第1の取得ステップと、

前記撮像装置の視点と前記取得された二次元座標（ $x_c, y_c$ ）とを通る第1の視線ベクトルを導出する第1の視線ベクトル導出ステップと、

前記パターンの画像データに三次元座標を投影する処理を行わずに、パターンの画像データ上における一次元座標（ $y_p$ ）と、前記投影装置のレンズによる歪を表すモデルと、前記撮像装置と前記投影装置の間のエピポーラ拘束とに基づいて、前記パターンの画像データ上における二次元座標（ $x'_p, y'_p$ ）を取得する第2の取得ステップと、

前記投影装置の視点と前記取得された二次元座標（ $x'_p, y'_p$ ）とを通る第2の視線ベクトルを導出する第2の視線ベクトル導出ステップと、

前記第1の視線ベクトルと、前記第2の視線ベクトルとの3次元空間における交点の座標を導出する座標導出ステップと

を含むことを特徴とする画像処理方法。

#### 【請求項11】

コンピュータを、請求項1乃至9の何れか1項に記載の画像処理装置の各手段として機能させるためのプログラム。 20

#### 【発明の詳細な説明】

##### 【技術分野】

##### 【0001】

本発明は、計測対象物の3次元形状計測を行う技術に関するものである。

##### 【背景技術】

##### 【0002】

画像を用いた物体表面の3次元形状計測は、実物からの3次元モデル生成や物体の位置姿勢計測等の様々な目的に利用される。画像を用いた3次元形状計測の技術の中で、構造化光と呼ばれるパターン光を照射するアクティブ方式が、計測の信頼性が高いことから広く利用されている。このようなパターン光を照射する装置としては、投影型の画像表示装置であるプロジェクタを用いるのが一般的である。プロジェクタを用いる3次元形状計測方法の代表例として、空間コード化法や位相シフト法が挙げられる。空間コード化法や位相シフト法は、2次元の縞状パターン光を投影することによって3次元形状計測を行う方法である。 30

##### 【0003】

空間コード化法では、異なる2値の縞状パターン光が時系列に投影されることにより、撮影された画像データ上の座標とプロジェクタ側の画像データ上の座標との対応付けが安定的に行われる。位相シフト法では、正弦波の縞状パターンの位相をずらした複数の縞状パターン光が投影され、撮影された画像データ上の各画素の濃度値の変化を見ることにより、プロジェクタ側の画像データ上の座標との対応付けが行われる。 40

##### 【0004】

上述した縞状パターン光を投影する方式で用いられるカメラやプロジェクタは、レンズを介して光を入力及び出力する機器である。従って、カメラによって撮影される画像データやプロジェクタから出力される画像データには、歪曲収差と呼ばれるレンズを通過することによる歪みが加わる。高精度な3次元形状計測を行うためには、このようなレンズ歪みの影響を適切に考慮する必要がある。カメラのレンズ歪みについては、予め歪みパラメータをキャリブレーションしておき、3次元形状計測時に、撮影された画像データ上の2次元座標を歪みのない座標に補正することが一般的に行われている。プロジェクタのレンズ歪みについても予めキャリブレーションしておくことで、画像データ上の2次元座標が 50

分かればカメラと同様に補正することが可能である。

#### 【0005】

しかし、上述した空間コード化法や位相シフト法等の縞状パターン光を用いる方法では、3次元形状計測のためにカメラ - プロジェクタ間の基線方向に対して略直交する縞状パターン光をプロジェクタによって投影することが一般的に行われている。従って、プロジェクタのレンズ歪みの補正を行うために、3次元形状計測に必要ないにも関わらず、3次元形状計測に必要な縞状パターン光と直交するパターン光を投影する必要があった。これに対し、非特許文献2には、レンズ歪みなしとして算出された仮の3次元座標をレンズ歪みありの投影モデルを満たすよう最適化することで、不要なパターン光を投影せずにプロジェクタのレンズ歪みを補正する方法が開示されている。

10

#### 【先行技術文献】

#### 【非特許文献】

#### 【0006】

【非特許文献1】井口, 佐藤, 三次元画像計測, 昭晃堂, 1990.

【非特許文献2】R. J. Valkenburg and A. M. McIvor, "Accurate 3D measurement using a structured light system," Image and Vision Computing, vol.16, no.2, pp.99-110, 1998.

#### 【発明の概要】

#### 【発明が解決しようとする課題】

#### 【0007】

20

しかしながら、プロジェクタのレンズ歪みを補正するため、本来、3次元形状計測に必要な縞状パターン光に直交するパターン光を投影することは、投影するパターン光の数が増える。そのため、画像データの撮影や画像データの処理に要する時間が増大するという問題がある。一方、非特許文献2に開示される方法では、別途パターン光を投射及び撮影することによる計測時間の増大はないものの、仮の3次元座標を求めたり、3次元座標の非線形最適化を行ったりといった処理が必要となる。これらの処理は、画像データ上の多数の点に対して行う必要があるため、計算時間が膨大となるという問題がある。

#### 【0008】

そこで、本発明の目的は、画像上における2次元位置が一意に決まらない所定のパターン光を3次元形状計測に用いる場合、投影装置のレンズ歪みを考慮した高精度な計測を高速に行うことにある。

30

#### 【課題を解決するための手段】

#### 【0009】

本発明の画像処理装置は、投影装置により所定の方向のみに輝度値が変化するパターンが投影された状態で撮像装置により撮像された計測対象物の画像データを入力する入力手段と、前記入力された画像に基づいて、前記計測対象物の画像データ上における二次元座標( $x'_c, y'_c$ )と、前記パターンの画像データ上における一次元座標( $y_p$ )とを対応付ける対応付け手段と、前記撮像装置のレンズによる歪みを表すモデルに基づき前記計測対象物の画像データにおける二次元座標( $x'_c, y'_c$ )を補正することにより、二次元座標( $x_c, y_c$ )を取得する第1の取得手段と、前記撮像装置の視点と前記取得された二次元座標( $x_c, y_c$ )とを通る第1の視線ベクトルを導出する第1の視線ベクトル導出手段と、前記パターンの画像データに三次元座標を投影する処理を行わずに、パターンの画像データ上における一次元座標( $y_p$ )と、前記投影装置のレンズによる歪みを表すモデルと、前記撮像装置と前記投影装置の間のエピポーラ拘束とにに基づいて、前記パターンの画像データ上における二次元座標( $x'_p, y'_p$ )を取得する第2の取得手段と、前記投影装置の視点と前記取得された二次元座標( $x'_p, y'_p$ )とを通る第2の視線ベクトルを導出する第2の視線ベクトル導出手段と、前記第1の視線ベクトルと、前記第2の視線ベクトルとの3次元空間における交点の座標を導出する座標導出手段とを有することを特徴とする。

40

#### 【発明の効果】

50

**【0010】**

本発明によれば、画像上における2次元位置が一意に決まらない所定のパターン光を3次元形状計測に用いる場合、投影装置のレンズ歪みを考慮した高精度な計測を高速に行うことができる。

**【図面の簡単な説明】****【0011】**

【図1】本発明の実施形態に係る画像処理装置の構成を示す図である。

【図2】プロジェクタによって照射される縞状パターン光を示す図である。

【図3】本発明の実施形態に係る画像処理装置を含む画像処理システムの構成を示す図である。

10

【図4】カメラの投影モデルを説明するための図である。

【図5】カメラとプロジェクタとのレンズ歪みの違いを説明するための図である。

【図6】本発明の実施形態に係る画像処理装置による3次元形状計測処理を示すフローチャートである。

【図7】図6のステップS1020における3次元座標算出処理の詳細を示すフローチャートである。

**【発明を実施するための形態】****【0012】**

以下、本発明を適用した好適な実施形態を、添付図面を参照しながら詳細に説明する。

**【0013】**

先ず、本発明の第1の実施形態について説明する。本発明の第1の実施形態では、空間コード化法を用いて3次元形状計測を行う際、プロジェクタのレンズ歪みを考慮した計測方法について説明する。

20

**【0014】**

図1は、本発明の第1の実施形態に係る画像処理装置の構成を示す図である。図1に示すように、画像処理装置101は、画像入力部110、対応付け部120、校正データ保存部130及び3次元座標算出部140を備える。また、画像処理装置101にはカメラ100が接続されている。なお、カメラ100は、撮像装置の例である。

**【0015】**

画像入力部110は、カメラ100によって撮像された画像データを入力する。空間コード化法では、1回の3次元形状計測毎に図2に示すような複数の2値の縞状パターン光を照射して画像データが撮影されるため、画像入力部110には複数の画像データが入力される。

30

**【0016】**

本実施形態では、撮像された画像データ上でのピットパターンの境界を推定するため、図2に示すような、5ビットのグレイコードを表す水平方向の縞状パターン光に加えて、その縞状パターンのネガとポジとを反転させた縞状パターンも照射する。

**【0017】**

図3は、本実施形態に係る画像処理装置101を含む画像処理システムの構成を示す図である。図3に示す画像処理システムは、カメラ100とプロジェクタ105とが互いに固定され、夫々が画像処理装置101に接続されている。画像処理装置101は、プロジェクタ105に対して図2に示す縞状パターン光のうちの何れかの縞状パターン光を照射するよう命令した後、カメラ100に対して画像データを撮像するように命令する。なお、プロジェクタ105は、投影装置の例である。

40

**【0018】**

対応付け部120は、画像入力部110において入力された複数の画像データ上の2次元座標と縞状パターンの画像データ上の座標（垂直方向の座標）との対応付けを行う。校正データ保存部130は、事前に校正されるカメラ100及びプロジェクタ105の内部パラメータ、並びに、カメラ100とプロジェクタ105との相対的な位置及び姿勢を保存する。内部パラメータは、焦点距離、主点位置、及び、歪みパラメータ（本実施形態で

50

は、放射方向の歪み係数、円周方向の歪み係数)である。カメラ100及びプロジェクタ105の内部パラメータは、例えばZhangの方法(Z. Zhang, "A flexible new technique for camera calibration," IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, vol.22, no.11, pp.1330-1334, 2000.)により事前に校正される。カメラ100とプロジェクタ105との相対的な位置及び姿勢は、内部パラメータを校正するときに同時に得られる校正パターンと、カメラ100とプロジェクタ105間の位置及び姿勢に基づいて算出される。

#### 【0019】

3次元座標算出部140は、対応付け部120によって得られた、撮像された画像データ上の2次元座標と縞状パターンの画像データ上の垂直座標との対応付けのそれについて、校正データ保存部130に保存されている校正データを用いて3次元座標を算出する。10

#### 【0020】

次に、本実施形態におけるカメラ100とプロジェクタ105との投影モデルについて説明する。先ず、カメラ100の投影モデルについて説明する。図4に示すように、カメラ座標系(3次元)を、Z軸が光軸と一致し、X軸及びY軸がそれぞれ画像データの水平方向及び垂直方向と平行になるようとする。カメラ座標系における3次元座標が(X, Y, Z)の点は、ピンホールカメラモデルによって、次の式1で表される正規化画像座標に投影される。

#### 【0021】

#### 【数1】

$$\begin{aligned}x &= \frac{X}{Z} \\y &= \frac{Y}{Z}\end{aligned}\quad \text{式1}$$

#### 【0022】

ここで正規化画像座標とは、カメラ座標系においてZ=1の位置に画像面を設定したときの画像面上での位置である。正規化画像座標系の原点は光軸(Z軸)と画像面の交点であり、x軸及びy軸はそれぞれ、画像データの水平方向及び垂直方向と平行である。実際に観察される正規化画像座標(x', y')は、次の式2に示すように、(x, y)にレンズ歪みの成分が加わったものになる。30

#### 【0023】

#### 【数2】

$$\begin{aligned}x' &= x\{1+k_{c1}(x^2+y^2)+k_{c2}(x^2+y^2)^2\}+2p_{c1}xy+p_{c2}(3x^2+y^2) \\y' &= y\{1+k_{c1}(x^2+y^2)+k_{c2}(x^2+y^2)^2\}+p_{c1}(x^2+3y^2)+2p_{c2}xy\end{aligned}\quad \text{式2}$$

#### 【0024】

ここで、 $k_{c1}$ 及び $k_{c2}$ はそれぞれ3次及び5次の放射方向の歪み係数であり、 $p_{c1}$ 及び $p_{c2}$ は円周方向の歪み係数である。なお、レンズ歪みモデルはこれに限るものではない。式2は、5次までの放射方向の歪みを考慮しているが、例えば3次や7次等のモデルであってもよい。また、式2では円周方向の歪みを考慮しているが、円周方向の歪みがないと仮定してもよい。即ち、歪みが加わった正規化画像座標(x', y')が、歪みが加わる前の正規化画像座標(x, y)の関数として表されるモデルであれば、いかなるモデルであってもよい。正規化画像座標が(x', y')の点の実画像データ上での座標(ピクセル座標)(u<sub>c</sub>, v<sub>c</sub>)は、次の式3で表される。40

#### 【0025】

## 【数3】

$$\begin{aligned} u_c &= f_{cx}x' + c_{cx} \\ v_c &= f_{cy}y' + c_{cy} \end{aligned}$$

式3

## 【0026】

ここで、 $f_{cx}$ 及び $f_{cy}$ は焦点距離であり、 $c_{cx}$ 及び $c_{cy}$ は主点位置である。上述したように、カメラ100の内部パラメータ $f_{cx}$ 、 $f_{cy}$ 、 $c_{cx}$ 、 $c_{cy}$ 、 $k_{c1}$ 、 $k_{c2}$ 、 $p_{c1}$ 及び $p_{c2}$ は、事前に校正しておく。

## 【0027】

次に、プロジェクタ105の投影モデルについて説明する。レンズを用いた光学系としてプロジェクタ105を見た場合、カメラ100との違いはレンズを通して画像を入力するか出力するかの違いだけであるといえる。そのため、プロジェクタ105の投影モデルは、基本的にはカメラ100と同様のモデルによって記述することができる。図5は、カメラ100とプロジェクタ105とのレンズ歪みの違いを示す図である。即ち、図5(a)は、カメラ100によって撮影される画像データの歪みを示しており、図5(b)は、プロジェクタ105によって投影される画像データの歪みを示している。図5に示すように、プロジェクタ105の場合には、レンズを介した画像の入出力がカメラ100と逆になるため、歪みありの正規化画像座標 $(x', y')$ と歪みなしの正規化画像座標 $(x, y)$ との関係もカメラ100と逆になる。そのため、 $(x', y')$ と $(x, y)$ との関係は、次の式4に表すようになる。

## 【0028】

## 【数4】

$$\begin{aligned} x &= x'\{1 + k_{p1}(x'^2 + y'^2) + k_{p2}(x'^2 + y'^2)^2\} + 2p_{p1}x'y' + p_{p2}(3x'^2 + y'^2) \\ y &= y'\{1 + kp_1(x'^2 + y'^2) + kp_2(x'^2 + y'^2)^2\} + p_{p1}(x'^2 + 3y'^2) + 2p_{p2}x'y' \end{aligned}$$

式4

## 【0029】

プロジェクタ105の内部パラメータ $f_{px}$ 、 $f_{py}$ 、 $c_{px}$ 、 $c_{py}$ 、 $k_{p1}$ 、 $k_{p2}$ 、 $p_{p1}$ 及び $p_{p2}$ もカメラ100の内部パラメータと同様に事前に校正しておく。プロジェクタ105の内部パラメータの校正では、平面形状の校正用パターンに対して水平及び垂直の両方向の縞状パターン光を投影することにより、校正用パターン上の座標とプロジェクタ105側の画像上の座標との対応付けが行われる。内部パラメータの校正は実際の計測に先立つて行われる作業であり、比較的時間の余裕があるため、水平及び垂直の両方向の縞状パターン光を投影することが可能である。一方、本実施形態は、事前に校正された内部パラメータを利用して実際に3次元形状計測を行う際のプロジェクタ歪み補正に関するものであり、高速化のためにできるだけ投影するパターン光を減らすこと目的としている。なお、カメラ100の歪みモデルと同様に、プロジェクタ105の歪みモデルについても、歪みが加わる前の正規化画像座標 $(x, y)$ が、歪みが加わった後の正規化画像座標 $(x', y')$ の関数として表されるモデルであれば、いかなるモデルであってもよい。

## 【0030】

図6は、本発明の第1の実施形態に係る画像処理装置によって実行される3次元形状計測処理を示すフローチャートである。以下、図6を参照しながら、第1の実施形態における3次元形状計測処理について説明する。

## 【0031】

ステップS1000において、画像入力部110は、カメラ100によって撮像された、縞状パターン光が照射されたシーンや物体の画像データを入力する。上述したように、空間コード化法では、1回の計測で複数の縞状パターン光が照射されるため、ここでは複数の画像データが入力される。

## 【0032】

10

20

30

40

50

ステップ S 1010において、対応付け部 120 は、ステップ S 1000において入力された画像データ上の2次元座標と縞状パターンの画像データ上の垂直座標との対応付けの集合を算出する。即ち、対応付け部 120 は、入力された各画像データを2値化処理することにより、画素毎にビットパターン（本実施形態では、5ビット）を算出する。対応付け部 120 は、このビットパターンを用いることにより、撮像された画像データ上の2次元座標と縞状パターンの画像データ上の垂直座標とを対応付ける。次に対応付け部 120 は、撮像された画像データ上におけるビットパターンが変化する境界部分の2次元座標（ $u_c, v_c$ ）を推定する。境界部分の推定は、例えば非特許文献 1 に開示されるように、ネガの縞状パターン光が照射された状態で撮影された画像データと、ポジの縞状パターン光が照射された状態で撮影された画像データとの濃淡値プロファイルに基づいて行われる。  
10 最後に、対応付け部 120 は、境界部分上の全ての点に対し、隣接するビットパターンに基づいて縞状パターンの画像データ上の垂直座標  $v_p$  を求める。

#### 【0033】

ステップ S 1020において、3次元座標算出部 140 は、ステップ S 1010において得られた、撮像された画像データ上の2次元座標（ $u_c, v_c$ ）と縞状パターンの画像データ上の垂直座標  $v_p$  との対応付けに基づいて、カメラ座標系を基準とした各点の3次元座標を算出する。各点の3次元座標は、カメラ 100 側の視線ベクトル（以下、カメラ視線ベクトルと称す）とプロジェクタ 105 側の視線ベクトル（以下、プロジェクタ視線ベクトルと称す）との交点の座標として算出される。ここで視線ベクトルとは、カメラ 100（又は、プロジェクタ 105）の光学中心と画像上の点とを結ぶ3次元ベクトルのことを表す。カメラ座標系（又は、プロジェクタ座標系）におけるカメラ視線ベクトル（又は、プロジェクタ視線ベクトル）は、正規化画像座標（ $x, y$ ）を用いることにより、 $[x \ y \ 1]^t$  と表すことができる。プロジェクタ 105 によって画像が空間中に投影される場合、出力される光の方向にレンズによる歪みが加わるため、プロジェクタ視線ベクトルはレンズ歪みが加わったベクトルとなる。一方、カメラ視線ベクトルとして、空間からの反射光がカメラ 100 に入射するベクトルを用いる必要があるため、レンズ歪みを除去したベクトルである必要がある。プロジェクタ 105 によって縞状パターン光が投影される場合、ステップ S 1010 における対応付けでは縞状パターンでの一方の座標（本実施形態では、垂直座標）しか決定することができないため、プロジェクタ視線ベクトルを決定することができない。そこで、本実施形態では、カメラ 100 とプロジェクタ 105 との間に成り立つエピポーラ拘束から得られる方程式と、プロジェクタ 105 のレンズ歪みモデルから得られる方程式との両方を連立方程式として解くことにより、プロジェクタ視線ベクトルを決定する。  
20 30

#### 【0034】

図 7 は、ステップ S 1020 における 3 次元座標算出処理の詳細を示すフローチャートである。以下、図 7 を参照しながら、ステップ S 1020 における 3 次元座標算出処理について詳細に説明する。

#### 【0035】

ステップ S 1100において、3次元座標算出部 140 は、カメラ 100 によって撮影された画像データ上の点とカメラ 100 の光学中心とを結ぶカメラ視線ベクトルを算出する。ここでは、上述したように、レンズ歪みが除去されたカメラ視線ベクトルが算出される。具体的には、撮影された画像データ上の座標（ $u_c, v_c$ ）に基づいて、式 2 及び式 3 を用いてカメラ視線ベクトル  $x_c$ （ $= [x_c \ y_c \ 1]^t$ ）が算出される。先ず、3次元座標算出部 140 は、式 3 を用いて、歪みありの正規化画像座標（ $x_c', y_c'$ ）を次の式 5 に示すように算出する。なお、ステップ S 1100 は、第 1 の視線ベクトル算出手段の処理例である。  
40

#### 【0036】

## 【数5】

$$\begin{aligned}x'_c &= \frac{u_c - c_{cx}}{f_{cx}} \\y'_c &= \frac{v_c - c_{cy}}{f_{cy}}\end{aligned}\quad \text{式5}$$

## 【0037】

次に、3次元座標算出部140は、算出した $x_c'$ 及び $y_c'$ を式2に代入して得られる $x_c$ 及び $y_c$ に関する方程式を連立方程式として解くことにより、歪みなしの正規化画像座標 $x_c$ 及び $y_c$ を算出する。なお、この連立方程式を解析的に解くことはできないため、3次元座標算出部140は、 $x_c$ 、 $y_c$ の初期値（例えば、 $x_c'$ 、 $y_c'$ ）を与えて、ニュートン法等の繰返し計算によって $x_c$ 及び $y_c$ を算出する。以上のように算出された $x_c$ 及び $y_c$ からカメラ視線ベクトル $x_c$ が得られる。

## 【0038】

ステップS1110において、3次元座標算出部140は、プロジェクタ105によって投影される縞状パターンの画像データ上の点とプロジェクタ105の光学中心とを結ぶプロジェクタ視線ベクトルを算出する。上述したように、ここではレンズ歪みが加わったプロジェクタ視線ベクトルが算出される。具体的には、プロジェクタ105によって投影される縞状パターンの画像データの垂直座標 $v_p$ から、プロジェクタ視線ベクトル $x_p'$ （ $= [x_p' \ y_p' \ 1]^t$ ）が算出される。先ず、3次元座標算出部140は、次の式6を用いて、座標 $v_p$ の正規化画像座標（歪みなし） $y_p$ を算出する。なお、ステップS1110は、第2の視線ベクトル算出手段の処理例である。

## 【0039】

## 【数6】

$$y_p = \frac{v_p - c_{py}}{f_{py}} \quad \text{式6}$$

## 【0040】

3次元座標算出部140は、式6を式4に代入することにより、次の式7に示す $x_p'$ 及び $y_p'$ に関する方程式を得る。

## 【0041】

## 【数7】

$$y_p' = y_p' \{1 + k_{p1}(x_p'^2 + y_p'^2) + k_{p2}(x_p'^2 + y_p'^2)^2\} + p_{p1}(x_p'^2 + 3y_p'^2) + 2p_{p2}x_p'y_p' \quad \text{式7}$$

## 【0042】

一方、三角測量の原理に基づいて3次元座標を推定するためには、カメラ視線ベクトルとプロジェクタ視線ベクトルとが3次元空間中の一点で交わる必要がある。この条件はエピポーラ拘束と呼ばれ、次の式8によって表される。

## 【0043】

## 【数8】

$$\begin{bmatrix} x_c & y_c & 1 \end{bmatrix} \mathbf{E} \begin{bmatrix} x_p' \\ y_p' \\ 1 \end{bmatrix} = 0 \quad \text{式8}$$

10

20

30

40

50

## 【0044】

但し、Eは基本行列(Essential matrix)と呼ばれる $3 \times 3$ 行列である。基本行列Eは、カメラ座標系でのプロジェクタ105の位置を表す3次元ベクトル $t = [t_x \ t_y \ t_z]^T$ 及び姿勢を表す $3 \times 3$ 行列Rを用いて、次の式9のように表される。

## 【0045】

## 【数9】

$$\mathbf{R} = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} \end{bmatrix}$$

10

$$\mathbf{E} = \begin{bmatrix} e_{11} & e_{12} & e_{13} \\ e_{21} & e_{22} & e_{23} \\ e_{31} & e_{32} & e_{33} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & -t_z & t_y \\ t_z & 0 & -t_x \\ -t_y & t_x & 0 \end{bmatrix} \mathbf{R} = \begin{bmatrix} 0 & -t_z & t_y \\ t_z & 0 & -t_x \\ -t_y & t_x & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} \end{bmatrix} \quad \text{式9}$$

## 【0046】

カメラ100とプロジェクタ105との相対的な位置及び姿勢は、事前にキャリブレーションされているため既知であることから、E行列も既知である。また、カメラ視線ベクトル $x_c$ も既知であることから、式8から次の式10に示す $x_p'$ 及び $y_p'$ に関する一次方程式が得られる。

20

## 【0047】

## 【数10】

$$ax_p' + by_p' + c = 0$$

式10

但し、

$$a = x_c e_{11} + y_c e_{21} + e_{31}$$

$$b = x_c e_{12} + y_c e_{22} + e_{32}$$

$$c = x_c e_{13} + y_c e_{23} + e_{33}$$

30

## 【0048】

3次元座標算出部140は、式7及び式10を $x_p'$ 及び $y_p'$ に関する拘束条件として利用することにより、非特許文献2に開示されるような仮の3次元座標を計算することなしに、プロジェクタ視線ベクトルを直接的に算出することができる。なお、 $(x_p', y_p')$ は、幾何学的には $x-y$ 平面上における式10によって表される直線(エピポーラーライン)と式7によって表される曲線との交点の座標である。3次元座標算出部140は、式7及び式10を $x_p'$ 及び $y_p'$ に関する連立方程式として解くことにより、 $x_p'$ 及び $y_p'$ を算出する。

## 【0049】

以下、 $x_p'$ 及び $y_p'$ の具体的な算出方法について説明する。先ず3次元座標算出部140は、式10により $y_p'$ を $x_p'$ で表すことにより、式7における $y_p'$ を消去して、次の式11に示す $x_p'$ に関する方程式を得る。

40

## 【0050】

## 【数11】

$$Ax_p'^5 + Bx_p'^4 + Cx_p'^3 + Dx_p'^2 + Ex_p' + F = 0 \quad \text{式11}$$

但し、

$$A = -k_{p2}(ab^4 + 2a^3b^2 + a^5)$$

$$B = -k_{p2}c(b^4 + 6a^2b^2 + 5a^4)$$

$$C = -k_{p2}(6ab^2 + 10a^3)c^2 - k_{p1}(ab^4 + a^3b^2)$$

$$D = -2p_{p2}ab^4 + p_{p1}(3a^2b^3 + b^5) - k_{p2}(2b^2 + 10a^2)c^3 - k_{p1}(b^4 + 3a^2b^2)c$$

$$E = -2p_{p2}b^4c + 6p_{p1}ab^3c - 5k_{p2}ac^4 - 3k_{p1}ab^2c^2 - ab^4$$

$$F = 3p_{p1}b^3c^2 - k_{p2}c^5 - k_{p1}b^2c^3 - b^4c - b^5y_p$$

10

## 【0051】

なお、式11は、 $x_p'$ に関する5次方程式である。5次方程式は解析的には解けないため、3次元座標算出部140は、次の式12に示すように $x_p'$ を算出する。先ず3次元座標算出部140は、 $x_p'$ の初期値を与える。 $x_p'$ の初期値 $x_{p0}'$ は、例えば式10において $y_p' = y_p$ としたときの $x_p'$ の値を用いる。

## 【0052】

## 【数12】

20

$$x_{p0}' = \frac{-by_p - c}{a} \quad \text{式12}$$

## 【0053】

次に、3次元座標算出部140は、式11の左辺を $x_{p0}'$ の近傍で $x_p'$ について線形近似し、次の式13に示すような、 $x_p'$ の微小変化 $\Delta x_p'$ により右辺が0となるような方程式を立式する。

## 【0054】

## 【数13】

30

$$Ax_{p0}'^5 + Bx_{p0}'^4 + Cx_{p0}'^3 + Dx_{p0}'^2 + Ex_{p0}' + F + (5Ax_{p0}'^4 + 4Bx_{p0}'^3 + 3Cx_{p0}'^2 + 2Dx_{p0}' + E)\Delta x_p' = 0 \quad \text{式13}$$

## 【0055】

3次元座標算出部140は、式13から $x_p'$ を算出し、 $x_{p0}'$ を $x_{p0}' + \Delta x_p'$ のように補正する。3次元座標算出部140は、得られた $x_{p0}'$ を新たな初期値として、上述した処理を解が収束するまで繰り返す。3次元座標算出部140は、得られた解を $x_p'$ として、式10から $y_p'$ を算出する。以上のようにして算出された $x_p'$ 及び $y_p'$ からプロジェクタ視線ベクトル $x_p'$ が得られる。なお、本実施形態では、 $x_p'$ 及び $y_p'$ を算出する際には $y_p'$ を消去して $x_p'$ を算出しているが、これに限るものではない。 $x_p'$ を消去して同様な方法により $y_p'$ を算出してもよい。

40

## 【0056】

ステップS1120において、3次元座標算出部140は、ステップS1100において算出したカメラ視線ベクトル $x_c$ と、ステップS1110において算出したプロジェクタ視線ベクトル $x_p'$ とに基づいて、3次元座標を算出する。3次元座標は、カメラ視線ベクトル $x_c$ を延長した3次元直線とプロジェクタ視線ベクトル $x_p'$ を延長した3次元直線との交点の座標として求められる。3次元直線の交点は、例えば次のように算出される。プロジェクタ視線ベクトル $x_p'$ を倍した位置にある点のカメラ座標系における3次元座標(X, Y, Z)は、次の式14のように表される。なお、ステップS1120は、

50

交点座標算出手段の処理例である。

【0057】

【数14】

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \alpha x'_p \\ \alpha y'_p \\ \alpha \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} t_x \\ t_y \\ t_z \end{bmatrix} \quad \text{式14}$$

【0058】

この点とカメラ100の光学中心とを結ぶベクトルがカメラ視線ベクトル $x_c$ に一致する 10 と、次の式15を得ることができる。

【0059】

【数15】

$$\begin{aligned} x_c &= \frac{\alpha(r_{11}x'_p + r_{12}y'_p + r_{13}) + t_x}{\alpha(r_{31}x'_p + r_{32}y'_p + r_{33}) + t_z} \\ y_c &= \frac{\alpha(r_{21}x'_p + r_{22}y'_p + r_{23}) + t_x}{\alpha(r_{31}x'_p + r_{32}y'_p + r_{33}) + t_z} \end{aligned} \quad \text{式15}$$

【0060】

3次元座標算出手部140は、式15の第1式又は第2式を について解くことにより、次の式16に示すように を算出する。

【0061】

【数16】

$$\alpha = \frac{t_x - x_c t_z}{x_c(r_{31}x'_p + r_{32}y'_p + r_{33}) - (r_{11}x'_p + r_{12}y'_p + r_{13})} \quad \text{式16}$$

または

$$\alpha = \frac{t_y - y_c t_z}{y_c(r_{31}x'_p + r_{32}y'_p + r_{33}) - (r_{21}x'_p + r_{22}y'_p + r_{23})} \quad 30$$

【0062】

さらに3次元座標算出手部140は、算出した を式11に代入し、3次元座標(X, Y, Z)を算出する。なお、3次元座標(X, Y, Z)の算出方法はこれに限るものではない。例えば、撮像された画像データ上及び縞状パターンの画像データ上に3次元座標(X, Y, Z)を投影したときの正規化画像座標がそれぞれ( $x_c, y_c$ )、( $x'_p, y'_p$ )であることに基づいて、3次元座標(X, Y, Z)を直接算出してよい。以上の3次元座標算出手段を、ステップS1010において得られた撮像された画像データ上の2次元座標と縞状パターンの画像データ上の垂直座標との対応付け全てについて行われる。

【0063】

以上のように、第1の実施形態では、縞状パターン光を照射して3次元形状計測を行う際に、レンズ歪みが加わったプロジェクタ視線ベクトルを推定することにより、レンズ歪みを正しく反映する3次元形状計測方法について説明した。この方法では、従来のように一度仮の3次元座標を算出したりする必要がないため、画像上における2次元位置が一意に決まらないパターン光を投影することによる3次元形状計測を高精度且つ高速に処理を行うことができる。

【0064】

次に、本発明の第2の実施形態について説明する。上述した第1の実施形態では、カメラ100及びプロジェクタ105のレンズ歪みを表すパラメータとして、歪みのない理想

10

20

30

40

50

的な画像座標を歪みのある画像座標に変換するときの係数（式2）を用いたときの3次元座標の算出について説明した。しかし、レンズ歪みを表すパラメータはこれに限るものではない。第2の実施形態では、レンズ歪みを表すパラメータが、歪みのある画像座標を歪みのない画像座標に変換するときの係数である場合の3次元座標の算出方法について説明する。なお、第2の実施形態に係る画像処理装置及び画像処理システムの構成は、図1及び図3に示した構成と同様であるため、以下の説明においても、図1及び図3の符号を用いるものとする。

## 【0065】

第2の実施形態では、カメラ100の歪みありの正規化画像座標（ $x'$ ,  $y'$ ）が、次の式17によって歪みなしの正規化画像座標（ $x$ ,  $y$ ）に変換される。

10

## 【0066】

## 【数17】

$$\begin{aligned}x &= x' \{1 + k_1(x'^2 + y'^2) + k_2(x'^2 + y'^2)^2\} + 2p_1x'y' + p_2(3x'^2 + y'^2) \\y &= y' \{1 + k_1(x'^2 + y'^2) + k_2(x'^2 + y'^2)^2\} + p_1(x'^2 + 3y'^2) + 2p_2x'y'\end{aligned}\quad \text{式17}$$

## 【0067】

プロジェクタ105の場合には、画像の入出力がカメラ100と逆になるため、次の式18のようになる。

20

## 【0068】

## 【数18】

$$\begin{aligned}x' &= x \{1 + k_1(x^2 + y^2) + k_2(x^2 + y^2)^2\} + 2p_1xy + p_2(3x^2 + y^2) \\y' &= y \{1 + k_1(x^2 + y^2) + k_2(x^2 + y^2)^2\} + p_1(x^2 + 3y^2) + 2p_2xy\end{aligned}\quad \text{式18}$$

## 【0069】

なお、第1の実施形態と同様に、歪みモデルはこれに限るものではない。即ち、カメラ100の場合には、歪みが加わる前の正規化画像座標（ $x$ ,  $y$ ）が、歪みが加わった後の正規化画像座標（ $x'$ ,  $y'$ ）の関数として表されるモデルであれば、いかなるモデルであってもよい。プロジェクタ105の場合には、歪みが加わった後の正規化画像座標（ $x'$ ,  $y'$ ）が、歪みが加わる前の正規化画像座標（ $x$ ,  $y$ ）の関数として表されるモデルであれば、いかなるモデルであってもよい。

30

## 【0070】

第2の実施形態における処理は、第1の実施形態とほぼ同一であるので、第1の実施形態と処理内容が異なるカメラ視線ベクトル及びプロジェクタ視線ベクトルの算出方法についてのみ説明する。

## 【0071】

第2の実施形態において、カメラ視線ベクトルは次のようにして算出される。先ず、3次元座標算出部140は、カメラ100によって撮像された画像データ上の座標（ $u_c$ ,  $v_c$ ）から、式5を用いて歪みありの正規化画像座標（ $x_c'$ ,  $y_c'$ ）を計算する。次に、3次元座標算出部140は、式17を用いて、歪みなしの正規化画像座標（ $x_c$ ,  $y_c$ ）を算出することにより、カメラ視線ベクトルを算出する。

40

## 【0072】

また、第2の実施形態において、プロジェクタ視線ベクトルは次のようにして算出される。先ず、3次元座標算出部140は、式6を用いて、垂直方向の座標 $v_p$ の正規化画像座標（歪みなし） $y_p$ を算出する。次に、3次元座標算出部140は、式18に $y_p$ を代入したものを式10に代入することで $x_p$ に関する5次方程式を得る。最後に、3次元座標算出部140は、5次方程式を解くことにより、 $x_p$ を求める。この5次方程式は解析的には解けないため、第1の実施形態で述べたような方法によって $x_p$ が算出される。以上の処理によって得られたカメラ視線ベクトル及びプロジェクタ視線ベクトルに基づき、第

50

1の実施形態と同じ方法によって3次元座標が算出される。

【0073】

以上のように、第2の実施形態では、レンズ歪みを表すパラメータが歪みのある画像座標を歪みのない画像座標に変換するときの係数である場合、プロジェクトタ105の歪みを考慮して3次元形状計測を行う方法について説明した。

【0074】

以上説明した実施形態では、プロジェクトタ105を用いて時系列に異なる2値コードパターン光を照射する空間コード化法に基づく3次元形状計測においてプロジェクトタ105のレンズ歪みを考慮する方法について説明した。しかし、3次元形状計測方法は空間コード化法に限るものではない。例えば位相シフト法等、空間コード化法と同様に縞状パターン光を使用する方法であれば、いかなる方法であってもよい。また、レンズを介して縞状パターン光を照射する方法であれば、レーザスリット光のような一次元ライン状パターン光を計測対象物に照射する方法であってもよい。10

【0075】

また、以上説明した実施形態では、プロジェクトタ105によって照射される縞状パターン光の縞が縞状パターン光の画像データにおける水平方向である場合について説明した。しかし、プロジェクトタ105によって照射されるパターン光は水平方向の縞状パターン光に限るものではなく、垂直方向の縞状パターン光等、他の向きのパターン光であってもよい。一次元ライン状パターン光のラインの向きについても同様である。垂直方向の縞状パターン光が照射される場合の、プロジェクト視線ベクトルの算出は、次のようにして行われる。20

【0076】

先ず、3次元座標算出部140は、次の式19により、プロジェクトタ105によって投影される画像の水平方向の座標 $u_p$ の正規化画像座標(歪みなし) $x_p$ を算出する。

【0077】

【数19】

$$x_p = \frac{u_p - c_{px}}{f_{px}} \quad \text{式19}$$

30

【0078】

次に、3次元座標算出部140は、式19を式4の第1式に代入することにより、次の式20に示す $x_p'$ 、 $y_p'$ に関する方程式を得る。

【0079】

【数20】

$$x_p' = x_p' \{1 + k_1(x_p'^2 + y_p'^2) + k_2(x_p'^2 + y_p'^2)^2\} + 2p_1x_p'y_p' + p_2(3x_p'^2 + y_p'^2) \quad \text{式20}$$

【0080】

次に、3次元座標算出部140は、第1の実施形態と同様に、式10及び式20を $x_p'$ 、 $y_p'$ に関する連立方程式として解くことにより、 $x_p'$ 、 $y_p'$ を算出することでプロジェクト視線ベクトルを算出する。40

【0081】

さらに、以上説明した実施形態では、プロジェクトタ105のレンズ歪みのモデルとして、5次までの放射方向の歪みと円周方向の歪みを有するモデルを想定していた。しかし、レンズ歪みのモデルはこれに限るものではない。例えば、円周方向の歪みがないモデルや、5次より低い次数の放射方向の歪み、または高い次数の放射方向の歪みを有するモデルであってもよい。レンズ歪みのモデルの放射方向の次数が異なる場合は、その次数に応じて式11の $x_p'$ の次数が変わる。例えば、式11は、3次までのモデルの場合には $x_p'$ の3次方程式、7次までの場合には $x_p'$ の7次方程式となるため、それを解けばよい。50

一方、円周方向の歪みがない場合には、式12の右辺が異なるだけの同様な方程式を得ることができるので、それを解けばよい。即ち、レンズ歪みのモデルが異なるとしても、上述したようにカメラ100とプロジェクタ105間のエピポーラ拘束から得られる方程式とレンズ歪みモデルから得られる方程式を解くことにより、プロジェクタ視線ベクトルを算出することができる。

## 【0082】

例えば、プロジェクタ105のレンズ歪みモデルとして、3次までの放射方向の歪みだけのモデルを用いる場合、式7は式21のようになる。

## 【0083】

## 【数21】

10

$$y_p = y'_p \{1 + k_{p1} (x'_p{}^2 + y'_p{}^2)\} \quad \text{式21}$$

## 【0084】

式21と式10とにより、式22に示す $x_p'$ に関する3次方程式が得られる。

## 【0085】

## 【数22】

$$Gx_p'^3 + Hx_p'^2 + Ix_p' + J = 0 \quad \text{式22}$$

但し、

20

$$G = -k_{p1}(ab^4 + a^3b^2)$$

$$H = -k_{p1}(b^4 + 3a^2b^2)c$$

$$I = -3k_{p1}ab^2c^2 - ab^4$$

$$J = -k_{p1}b^2c^3 - b^4c - b^5y_p$$

## 【0086】

3次元座標算出部140は、式22を用いて $x_p'$ を算出することにより、プロジェクタ視線ベクトルを計算することができる。

30

## 【0087】

上述した実施形態によれば、画像上での2次元位置が一意に決まらないパターン光を投影することによる3次元形状計測を高精度且つ高速に行うことができる。

## 【0088】

また、本発明は、以下の処理を実行することによっても実現される。即ち、上述した実施形態の機能を実現するソフトウェア（プログラム）を、ネットワーク又は各種記憶媒体を介してシステム或いは装置に供給し、そのシステム或いは装置のコンピュータ（またはCPUやMPU等）がプログラムを読み出して実行する処理である。

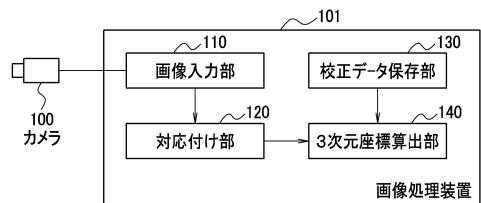
## 【符号の説明】

## 【0089】

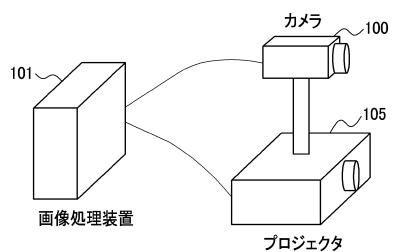
40

100：カメラ、101：画像処理装置、105：プロジェクタ、110：画像入力部、120：対応付け部、130：3次元座標算出部、140：校正データ保存部

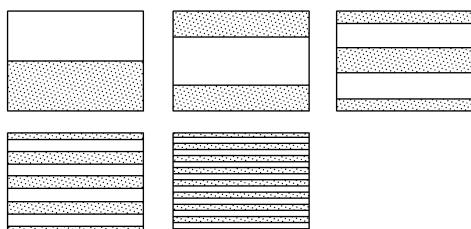
【図1】



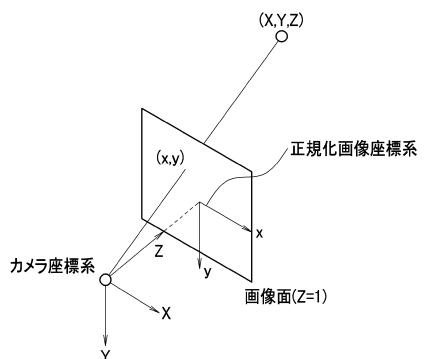
【図3】



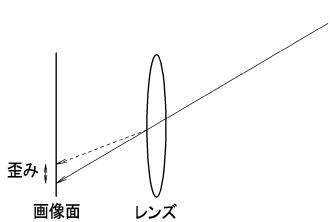
【図2】



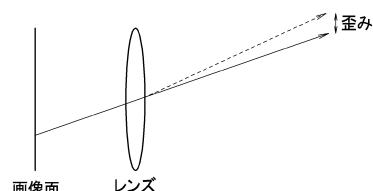
【図4】



【図5】

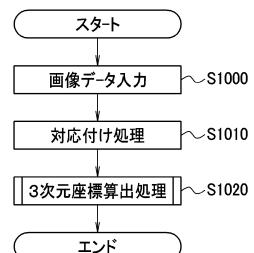


(a) カメラ

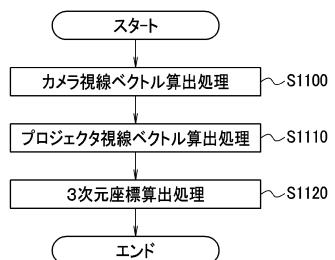


(b) プロジェクタ

【図6】



【図7】



---

フロントページの続き

(56)参考文献 特開2004-317495(JP,A)  
国際公開第2006/120759(WO,A1)  
特開2010-203867(JP,A)

(58)調査した分野(Int.Cl., DB名)

G01B 11/00 - 11/30  
G06T 1/00