

(19) 日本国特許庁(JP)

(12) 特 許 公 報(B2)

(11) 特許番号

特許第6384961号  
(P6384961)

(45) 発行日 平成30年9月5日(2018.9.5)

(24) 登録日 平成30年8月17日(2018.8.17)

(51) Int.Cl. F I  
 H O 4 N 5/232 (2006.01) H O 4 N 5/232  
 G O 6 T 3/00 (2006.01) G O 6 T 3/00 7 2 0

請求項の数 8 (全 16 頁)

<p>(21) 出願番号 特願2015-98252 (P2015-98252)                  (22) 出願日 平成27年5月13日 (2015.5.13)                  (65) 公開番号 特開2016-213783 (P2016-213783A)                  (43) 公開日 平成28年12月15日 (2016.12.15)                  審査請求日 平成29年7月14日 (2017.7.14)</p> <p>特許法第30条第2項適用 情報処理学会研究報告 コ                  ンピュータビジョンとイメージメディア (CVIM)                  V o l . 2 0 1 4 - C V I M - 1 9 4 N o . 2 1 p                  p . 1 - 8 に発表</p>	<p>(73) 特許権者 000004226                  日本電信電話株式会社                  東京都千代田区大手町一丁目5番1号</p> <p>(73) 特許権者 504132272                  国立大学法人京都大学                  京都府京都市左京区吉田本町36番地1</p> <p>(74) 代理人 110001634                  特許業務法人 志賀国際特許事務所</p> <p>(72) 発明者 志水 信哉                  東京都千代田区大手町一丁目5番1号 日                  本電信電話株式会社内</p> <p>(72) 発明者 藤井 憲作                  東京都千代田区大手町一丁目5番1号 日                  本電信電話株式会社内</p>
--	--

最終頁に続く

(54) 【発明の名称】 カメラキャリブレーション装置、カメラキャリブレーション方法、カメラキャリブレーションプログラム及び記録媒体

(57) 【特許請求の範囲】

【請求項1】

屈折層を介して被写体を撮影することによって得られる画像の各画素と、前記被写体からの光線との対応付けを行うカメラキャリブレーション装置であって、

前記被写体として姿勢の異なる較正物体を撮影した画像群から、前記較正物体の姿勢ごとに、前記画素と前記較正物体上の位置との対応関係に関する情報を取得する対応関係取得部と、

前記対応関係取得部で取得された前記対応関係に関する情報を用いて、前記較正物体の姿勢を推定して姿勢情報を出力する姿勢推定部と、

前記対応関係取得部で取得された前記対応関係に関する情報と、前記姿勢推定部で推定された前記姿勢情報とを用いて、画素と光線との対応関係を示す光線情報を取得する光線情報取得部とを備え、

前記姿勢推定部は、複数の画像間における同一画素でサンプリングされた前記較正物体上の位置が、撮影空間において一直線上に存在することを用いて前記較正物体の姿勢を推定するカメラキャリブレーション装置。

【請求項2】

前記姿勢推定部は、同一画素でサンプリングされた前記較正物体上の位置から、1つの画素に対して2本以上の線分を求め、当該線分に対応する方向ベクトル間の外積を最小化するように前記較正物体の姿勢を推定する請求項1に記載のカメラキャリブレーション装置。

10

20

## 【請求項 3】

前記対応関係に関する情報と、前記姿勢情報とを用いて、同一画素でサンプリングされた前記較正物体上の位置から、1つの画素に対して2本以上の線分を求め、当該線分に対応する方向ベクトル間の外積に基づくキャリブレーション評価値を求めるキャリブレーション評価部を更に備える請求項1または請求項2に記載のカメラキャリブレーション装置。

## 【請求項 4】

カメラに対する姿勢の異なる前記較正物体を撮影した画像群から、前記カメラからの距離の違いが少なく、カメラに対する姿勢が異なる較正物体を撮影した3枚以上の画像群を選択する対象画像選択部を更に備え、

前記対応関係取得部は、前記対象画像選択部が選択した画像群から較正物体の姿勢ごとに、画素と較正物体上の位置との対応関係に関する情報を取得する請求項1から請求項3のいずれか一項に記載のカメラキャリブレーション装置。

10

## 【請求項 5】

前記較正物体を撮影した画像に対して、前記較正物体が撮影されている領域の割合にしたがって、前記カメラから前記較正物体までの距離を推定する距離推定部と、

前記較正物体を撮影した画像群に対して、前記較正物体の撮影されている領域の形状の違いにしたがって、前記カメラに対する前記較正物体の姿勢の類似度を推定する類似度推定部とを更に備え、

前記対象画像選択部は、前記距離推定部で推定された距離と、前記類似度推定部で推定された類似度とに基づいて、前記カメラからの距離の違いが少なく、カメラに対する姿勢が異なる較正物体を撮影した3枚以上の画像群を選択する請求項4に記載のカメラキャリブレーション装置。

20

## 【請求項 6】

屈折層を介して被写体を撮影することによって得られる画像の各画素と、前記被写体からの光線との対応付けを行うカメラキャリブレーション方法であって、

前記被写体として姿勢の異なる較正物体を撮影した画像群から、前記較正物体の姿勢ごとに、前記画素と前記較正物体上の位置との対応関係に関する情報を取得する対応関係取得ステップと、

前記対応関係取得ステップで取得された前記対応関係に関する情報を用いて、前記較正物体の姿勢を推定して姿勢情報を出力する姿勢推定ステップと、

前記対応関係取得ステップで取得された前記対応関係に関する情報と、前記姿勢推定ステップで推定された前記姿勢情報とを用いて、画素と光線との対応関係を示す光線情報を取得する光線情報取得ステップとを備え、

前記姿勢推定ステップは、複数の画像間における同一画素でサンプリングされた前記較正物体上の位置が、撮影空間において一直線上に存在することを用いて前記較正物体の姿勢を推定するカメラキャリブレーション方法。

30

## 【請求項 7】

請求項6に記載のカメラキャリブレーション方法をコンピュータに実行させるためのカメラキャリブレーションプログラム。

40

## 【請求項 8】

請求項7に記載のカメラキャリブレーションプログラムを記録した記録媒体。

## 【発明の詳細な説明】

## 【技術分野】

## 【0001】

本発明は、カメラと被写体の間に屈折層が存在する場合におけるカメラキャリブレーション装置、カメラキャリブレーション方法、カメラキャリブレーションプログラム及び記録媒体に関する。

## 【背景技術】

## 【0002】

50

従来、カメラで撮影された画像から、三次元情報として、例えば被写体の形状や、被写体とカメラとの位置関係を抽出する技術が知られている。このような技術は、ロボットビジョン、拡張現実感を提供するシステム等において、非常に重要となる技術である。このような三次元情報の抽出を行うためには、画像上の各画素と現実空間での光線の対応関係に関する情報と、複数のカメラ間の位置関係に関する情報とを取得する必要がある。そして、これらの情報を取得する処理は、カメラキャリブレーションと呼ばれている。特に、画像上の各画素と現実空間での光線の対応関係に関する情報を取得する処理は、内部キャリブレーションと呼ばれ、複数のカメラ間の位置関係に関する情報を取得する処理は、外部キャリブレーションと呼ばれている。

#### 【0003】

一般的なカメラキャリブレーションでは、オブジェクトと画像平面の間の写像が、ピンホールカメラモデルなど透視投影カメラモデルで表現できることを前提としている。そのような透視投影カメラモデルでは、オブジェクトからの光線は、カメラの投影中心に向かって直進しながら集束することを前提としている。そのため、カメラとオブジェクトの間に屈折層がある場合は、スネルの法則に基づき屈折層の屈折をモデル化することで、カメラキャリブレーションを実現する。そして、屈折のモデル化を行うためには、屈折層の屈折率及び位置・形状に関する情報が必要となる。しかし、予めそれらの情報を得ることは、一般的に困難であるため、屈折のモデル化を行うことができないという問題がある。また、仮に、それらの情報が得られたとしても、屈折層の形状等が複雑な場合は、屈折のモデル化の処理も複雑になるという問題がある。

#### 【0004】

透視投影カメラモデルとは異なるカメラモデルとして、非特許文献1で提案されているRaxel(ray-pixel)カメラモデルが存在する。Raxelカメラモデルでは、画像上の各画素と三次元空間における光線とを直接対応付ける。そのため、屈折層における光線の屈折をモデル化せずに、カメラキャリブレーションにおいて、画素と光線の対応付けを求めることができる。

例えば、非特許文献2に記載の手法は、カメラとの間に屈折層を含んだ撮影対象とする空間中に、チェッカーボードなどの較正物体を設置し、画素からその較正物体平面上の点へのマッピングを表す近似関数を求めることでキャリブレーションを実現している。

#### 【先行技術文献】

#### 【非特許文献】

#### 【0005】

【非特許文献1】Michael D. Grossberg, Shree K. Nayar, "The Raxel Imaging Model and Ray-Based Calibration," International Journal of Computer Vision, 61(2), pp. 119-137, 2005.

【非特許文献2】Tomohiko Yano, Shohei Nobuhara, Takashi Matsuyama, "3D Shape from Silhouettes in Water for Online Novel-View Synthesis," 第16回 画像の認識理解シンポジウム(MIRU), 2013.

#### 【発明の概要】

#### 【発明が解決しようとする課題】

#### 【0006】

しかしながら、非特許文献2に記載の手法は、近似関数で近似する精度の問題から屈折層の形状に制約があり、任意の屈折層に適用するのは困難であるという問題がある。さらに、キャリブレーションにおいて、カメラに対する較正物体の姿勢に関する情報が必要となる。そして、その姿勢に関する情報を取得するために、経路中に屈折層を含む空間に設置された較正物体を撮影すると同時に、屈折層を含まない空間に設置された別の較正物体を撮影する必要がある。つまり、非特許文献2に記載の手法は、本来対象とする空間をカメラの一部でしか撮影できないことになり、高精細な画像を取得することができないという問題がある。また、非特許文献2に記載の手法は、屈折層を含む空間および屈折層を含まない空間の両方の空間が撮影可能な状況でしか、使用できないという問題がある。

10

20

30

40

50

## 【0007】

上記事情に鑑み、本発明は、カメラと被写体との間に未知の屈折層または複雑な形状の屈折層が存在する場合であっても、カメラモデルのキャリブレーションを実現することができるカメラキャリブレーション装置、カメラキャリブレーション方法、カメラキャリブレーションプログラム及び記録媒体を提供することを目的とする。

## 【課題を解決するための手段】

## 【0008】

本発明の一態様は、屈折層を介して被写体を撮影することによって得られる画像の各画素と、前記被写体からの光線との対応付けを行うカメラキャリブレーション装置であって、前記被写体として姿勢の異なる較正物体を撮影した画像群から、前記較正物体の姿勢ごとに、前記画素と前記較正物体上の位置との対応関係に関する情報を取得する対応関係取得部と、前記対応関係取得部で取得された前記対応関係に関する情報を用いて、前記較正物体の姿勢を推定して姿勢情報を出力する姿勢推定部と、前記対応関係取得部で取得された前記対応関係に関する情報と、前記姿勢推定部で推定された前記姿勢情報とを用いて、画素と光線との対応関係を示す光線情報を取得する光線情報取得部とを備え、前記姿勢推定部は、複数の画像間における同一画素でサンプリングされた前記較正物体上の位置が、撮影空間において一直線上に存在することを用いて前記較正物体の姿勢を推定するカメラキャリブレーション装置である。

10

## 【0009】

本発明の一態様は、前記姿勢推定部は、同一画素でサンプリングされた前記較正物体上の位置から、1つの画素に対して2本以上の線分を求め、当該線分に対応する方向ベクトル間の外積を最小化するように前記較正物体の姿勢を推定する。

20

## 【0010】

本発明の一態様は、前記対応関係に関する情報と、前記姿勢情報とを用いて、同一画素でサンプリングされた前記較正物体上の位置から、1つの画素に対して2本以上の線分を求め、当該線分に対応する方向ベクトル間の外積に基づくキャリブレーション評価値を求めるキャリブレーション評価部を更に備える。

## 【0011】

本発明の一態様は、カメラに対する姿勢の異なる前記較正物体を撮影した画像群から、前記カメラからの距離の違いが少なく、カメラに対する姿勢が異なる較正物体を撮影した3枚以上の画像群を選択する対象画像選択部を更に備え、前記対応関係取得部は、前記対象画像選択部が選択した画像群から較正物体の姿勢ごとに、画素と較正物体上の位置との対応関係に関する情報を取得する。

30

## 【0012】

本発明の一態様は、前記較正物体を撮影した画像に対して、前記較正物体が撮影されている領域の割合にしたがって、前記カメラから前記較正物体までの距離を推定する距離推定部と、前記較正物体を撮影した画像群に対して、前記較正物体の撮影されている領域の形状の違いにしたがって、前記カメラに対する前記較正物体の姿勢の類似度を推定する類似度推定部とを更に備え、前記対象画像選択部は、前記距離推定部で推定された距離と、前記類似度推定部で推定された類似度とに基づいて、前記カメラからの距離の違いが少なく、カメラに対する姿勢が異なる較正物体を撮影した3枚以上の画像群を選択する。

40

## 【0013】

本発明の一態様は、屈折層を介して被写体を撮影することによって得られる画像の各画素と、前記被写体からの光線との対応付けを行うカメラキャリブレーション方法であって、前記被写体として姿勢の異なる較正物体を撮影した画像群から、前記較正物体の姿勢ごとに、前記画素と前記較正物体上の位置との対応関係に関する情報を取得する対応関係取得ステップと、前記対応関係取得ステップで取得された前記対応関係に関する情報を用いて、前記較正物体の姿勢を推定して姿勢情報を出力する姿勢推定ステップと、前記対応関係取得ステップで取得された前記対応関係に関する情報と、前記姿勢推定ステップで推定された前記姿勢情報とを用いて、画素と光線との対応関係を示す光線情報を取得する光線

50

情報取得ステップとを備え、前記姿勢推定ステップは、複数の画像間における同一画素でサンプリングされた前記較正物体上の位置が、撮影空間において一直線上に存在することをを用いて前記較正物体の姿勢を推定するカメラキャリブレーション方法である。

【0014】

本発明の一態様は、上記カメラキャリブレーション方法をコンピュータに実行させるためのカメラキャリブレーションプログラムである。

【0015】

本発明の一態様は、上記カメラキャリブレーションプログラムを記録した記録媒体である。

【発明の効果】

10

【0016】

本発明によれば、カメラと被写体との間に未知の屈折層または複雑な形状の屈折層が存在する場合であっても、カメラモデルのキャリブレーションを実現することができる。

【図面の簡単な説明】

【0017】

【図1】第1の実施形態におけるカメラキャリブレーションを行う撮影空間を示す図である。

【図2】第1の実施形態における第1キャリブレーション装置の構成を示すブロック図である。

【図3】第1の実施形態における第1キャリブレーション装置10の動作を示すフローチャートである。

20

【図4】第2の実施形態におけるカメラキャリブレーションを行う撮影空間を示す図である。

【図5】第2の実施形態における第2キャリブレーション装置の構成を示すブロック図である。

【図6】第2の実施形態における第2キャリブレーション装置20の動作を示すフローチャートである。

【図7】第1の実施形態における第1キャリブレーション装置10又は第2の実施形態における第2キャリブレーション装置20のハードウェアの構成例を示す図である。

【発明を実施するための形態】

30

【0018】

以下、図面を参照して、本発明の実施形態におけるカメラキャリブレーション装置について説明する。

(第1の実施形態)

まず、第1の実施形態として、1つのカメラにおけるキャリブレーションとして、撮影空間中の光線とカメラで撮影された画像の画素とのマッピングの処理(内部キャリブレーション)について説明する。図1は、第1の実施形態におけるカメラキャリブレーションが行われる撮影空間を示す図である。図1に示す通り、カメラ1と撮影空間との間に未知の屈折層2が存在し、撮影空間中に較正物体3、3'が設置されている。ここで、較正物体3'は、較正物体3と同一物体であって、較正物体3の姿勢が変更された後の状態を示すものである。なお、較正物体3として、どのような物体を用いても構わないが、後述する画素と較正物体3上の位置との対応関係が得られるものを使う必要がある。本実施形態においては、較正物体3として、グレイコードを表示する平面ディスプレイなどが用いられる。

40

【0019】

図2は、第1の実施形態における第1キャリブレーション装置の構成を示すブロック図である。図2に示すように、第1キャリブレーション装置10は、画像入力部11と、対応関係取得部12と、姿勢推定部13と、光線情報出力部14とを備えている。図1には、示していないが、第1キャリブレーション装置10は、カメラ1で撮影された画像を入力可能で、入力された画像に対して画像処理を行うコンピュータ端末である。

50

## 【 0 0 2 0 】

画像入力部 1 1 は、較正物体 3 を撮影した画像（群）を入力する。対応関係取得部 1 2 は、画像入力部 1 1 により入力された画像中の画素と較正物体 3 上の位置とを対応付ける情報を取得する。姿勢推定部 1 3 は、複数の較正物体 3、3' 間の相対的な姿勢を推定する。光線情報出力部 1 4 は、画素に対して光線に対応付ける。

## 【 0 0 2 1 】

次に、図 2 に示す第 1 キャリブレーション装置 1 0 の動作を説明する。図 3 は、第 1 の実施形態における第 1 キャリブレーション装置 1 0 の動作を示すフローチャートである。

まず、画像入力部 1 1 は、較正物体 3 の姿勢を変化させながら撮影した画像群  $\{ I_{n,m} \mid n = 0, \dots, N - 1, m = 0, \dots, M_n - 1 \}$  を入力する（ステップ S 1 0 1）。ここで、入力された画像群中に含まれる較正物体 3 の姿勢の数を  $N$  とし、較正物体 3 が  $n$  番目の姿勢である場合の画像の枚数を  $M_n$  とする。ここで、 $N$  は 3 以上とし、 $M_n$  は画素と  $n$  番目の姿勢の較正物体 3 上の位置を対応付けるのに必要な画像の枚数とする。 $M_n$  は較正物体 3 の種類や撮影空間の大きさなどに依存する。

10

## 【 0 0 2 2 】

次に、対応関係取得部 1 2 は、較正物体 3 の姿勢ごとに、画素と較正物体 3 上の位置を対応付ける（ステップ S 1 0 2）。具体的には、画像平面上の座標値（画素位置）と、較正物体 3 上で定義された座標系における座標値を対応付ける。ここでの方法は、較正物体 3 の種類によって異なる。

## 【 0 0 2 3 】

例えば、較正物体 3 が、平面ディスプレイで構成されており、かつ、較正物体 3 が、座標値をエンコードしたグレイコードパターンの系列を表示している場合について説明する。画像入力部 1 1 は、グレイコードパターンを表示する較正物体 3 を、撮影して得た画像群を入力する。対応関係取得部 1 2 は、入力された画像群から各画素で撮影された信号の系列を求め、それをデコードすることで、その画素に対応する較正物体 3 上の座標値を得ることができる。グレイコードを用いた画素と較正物体 3 の平面上の位置との対応付けに関しては、例えば非特許文献 1 に詳細が記載されている。

20

## 【 0 0 2 4 】

ここで、ステップ S 1 0 2 の結果として得られる、画素  $k$  に対する  $n$  番目の姿勢の較正物体 3 上の点  $P_{k,m}$  の座標値を  $p_{k,n}$  ( $k = 1, \dots, \text{numPixels}, n = 1, \dots, N$ ) で表す。ここで、 $\text{numPixels}$  は、光線との対応関係を求める画素の数である。

30

## 【 0 0 2 5 】

各画素と較正物体 3 上の座標値との対応付けた後、姿勢推定部 1 3 は、較正物体 3 の姿勢に関する情報を推定する（ステップ S 1 0 3）。姿勢推定部 1 3 において、どのように較正物体 3 の姿勢に関する情報を表すかは、限定されるものではない。例えば、較正物体 3 のある姿勢を基準として、異なる姿勢となる較正物体 3' を、基準の姿勢に変換するための回転行列  $R_n$  と並進ベクトル  $t_n$  とを用いる形式で表しても構わない。以下の説明では、姿勢推定部 1 3 は、 $n = 1$  に対する姿勢を基準とした回転行列と並進ベクトルを用いて姿勢を表現する。

## 【 0 0 2 6 】

この回転行列  $R_n$  と並進ベクトル  $t_n$  を求める処理では、各画素でサンプリングされる光線は、撮影空間中を直進してきたものであるという性質を用いる。つまり、画素  $k$  でサンプリングされた較正物体 3 上の点  $P_{k,n}$  が、撮影空間中で同一直線上に存在することを用いる。回転行列  $R_n$  と並進ベクトル  $t_n$  を用いると、以下の（式 1）のように、画素  $k$  に対する  $n$  番目の姿勢の較正物体 3 上の座標値  $p_{k,n}$  を、1 番目の姿勢に対する座標系（以下、基準座標系と呼ぶ）における座標値  $P_{k,n}^{[1]}$  で表すことができる。

40

【数 1】

$$p_{k,n}^{[i]} = R_n p_{k,n} + t_n \quad \dots \text{(式 1)}$$

【0027】

このとき、基準座標系での線分  $P_{k,1} P_{k,n}$  の方向ベクトルは以下の(式 2)で与えられる。

【数 2】

10

$$\overrightarrow{P_{k,1} P_{k,n}} = R_n p_{k,n} + t_n - p_{k,1} \quad \dots \text{(式 2)}$$

【0028】

画素  $k$  でサンプリングされた較正物体 3 上の点が撮影空間中で同一直線上に存在する場合、姿勢  $i$  と姿勢  $j$  の方向ベクトルの外積が 0 となる。つまり、以下の(式 3)で示される外積が 0 となる回転上列と並進ベクトルが求める姿勢となる。

【数 3】

20

$$\overrightarrow{P_{k,1} P_{k,2}} \times \overrightarrow{P_{k,1} P_{k,3}} = M_k h = 0 \quad \dots \text{(式 3)}$$

【0029】

ここで、 $\times$  は外積を示し、 $M_k$  は座標値  $p_{k,n}$  のみで構成される行列、 $h$  は回転行列及び並進ベクトルで構成されるベクトルである。なお、ここで同一直線上に存在する条件が成立するためには、3 点以上の点が存在する必要がある。つまり、 $N \geq 3$  である必要がある。ここでは  $N = 3$  として説明を行うが、 $N > 3$  の場合に拡張可能であることは容易に類推可能である。

30

【0030】

上記の条件は、画素ごとに得られるため、全てをまとめると下記の(式 4)に示す連立方程式が得られる。

【数 4】

$$Mh = \left( M_1^T, \dots, M_{numPixs}^T \right)^T h = 0 \quad \dots \text{(式 4)}$$

40

姿勢推定部 13 は、この連立方程式を解くことで回転行列と並進ベクトルを求めて、較正物体 3 の姿勢を推定する。なお、(式 4)の連立方程式は、どのような方法を用いても構わない。

【0031】

なお、(式 4)に示す連立方程式を解かずに較正物体 3 の姿勢を求める方法もある。例えば、外積の大きさを最小化するような最適化問題を解くことで較正物体 3 の姿勢を推定しても構わない。つまり、較正物体 3 の姿勢を表すベクトルを  $h^{\wedge}$  (実際のハット (^) は  $h$  の上) とし、画素  $k$  でサンプリングされた較正物体 3 上の点によって構成される線分 (2 本以上の線分) の外積を  $g_k$  で表すと、較正物体 3 の姿勢を示すベクトル  $h$  は次の(式 5)に示す最小化問題を解くことで得られる。

50

【数 5】

$$h = \arg \min_{\hat{h}} G(\hat{h}) = \arg \min_{\hat{h}} \left( g_1(\hat{h})^2, \dots, g_{numPixs}(\hat{h})^2 \right) \quad \dots \text{ (式 5)}$$

【0032】

また、外積  $g_k$  を用いた  $G$  の代わりに、以下の (式 6) を用いて、外積のノルム  $g'_k$  を用いた  $G'$  を最小化することで較正物体 3 の姿勢を示すベクトル  $h$  を求めても構わない。較正物体 3 の姿勢を示すベクトル  $h$  のノルムを用いることで外積の各成分を最小化するのではなく、全成分を効率よく最小化する。これにより、最小化に要する演算量を低下させ、較正物体 3 の姿勢を示す適切なベクトル  $h$  を求めることが可能となる。

10

【数 6】

$$h = \arg \min_{\hat{h}} G'(\hat{h}) = \arg \min_{\hat{h}} \left( g'_1(\hat{h})^2, \dots, g'_{numPixs}(\hat{h})^2 \right) \quad \dots \text{ (式 6)}$$

【0033】

更に、姿勢推定部 13 は、外積を用いずに方向ベクトルが一致する条件を用いて、較正物体 3 の姿勢を推定するようにしても構わない。例えば、画素  $k$  でサンプリングされた較正物体 3 上の点の方向ベクトルの差分ベクトルの単位ベクトル  $d_k$  とすると、以下の (式 7)、(式 8) を用いた最小化問題を解くことで、較正物体 3 の姿勢を示すベクトル  $h$  を求めることができる。

20

【数 7】

$$h = \arg \min_{\tilde{h}} D(\tilde{h}) = \arg \min_{\tilde{h}} \left( d_1(\tilde{h})^2, \dots, d_{numPixs}(\tilde{h})^2 \right) \quad \dots \text{ (式 7)}$$

$$d_k(h) = \frac{\overrightarrow{P_{k,1}P_{k,2}} - \overrightarrow{P_{k,1}P_{k,3}}}{\left\| \overrightarrow{P_{k,1}P_{k,2}} - \overrightarrow{P_{k,1}P_{k,3}} \right\|} \quad \dots \text{ (式 8)}$$

30

【0034】

較正物体 3 の姿勢に関する情報を推定した後、光線情報出力部 14 は、各画素に対して、その画素でサンプリングされる光線に対応付けた光線情報を生成する (ステップ S104)。生成された光線情報は、第 1 キャリブレーション装置 10 の出力となる。なお、どのような形で対応付けを表現しても構わない。本実施形態における光線情報は、例えば、各画素をインデックスとし、光線を表す直線の式を返すルックアップテーブルを用いて表したものである。

【0035】

なお、較正物体 3 の姿勢を推定する処理 (ステップ S103) が終了した後、キャリブレーションの精度、つまり較正物体 3 の姿勢の推定の精度を表す評価値を求めても構わない。この評価値は、較正物体 3 の姿勢の推定が正しく行われたか否かを表すことのできるものであれば、どのような評価値を用いても構わない。評価値の具体例 1 は、画素ごとに得られる較正物体 3 上の点で構成される線分の外積のノルムについて、和や最大値、分散を求めて、評価値としたものである。また、評価値の具体例 2 は、画素ごとに得られる較正物体 3 上の点で構成される方向ベクトルの差分ベクトルのノルムについて、和や最大値、分散を求めて、評価値としたものである。更に、評価値の具体例 3 は、各画素に対応付けられた光線と較正物体 3 上の点の距離について、和や最大値、分散を求めて、評価値としたものである。更に、評価値の具体例 4 は、各画素に対応付けられた光線と較正物体 3 上の点の較正物体 3 平面上での距離について、和や最大値、分散を求めて、評価値としたものである。

40

50



## 【 0 0 3 6 】

求めた評価値が予め定められた精度を満たさないことを表す場合、第 1 キャリブレーション装置 1 0 は、別の姿勢の較正物体 3 ' を撮影した画像を追加し、更新された画像群を用いて較正物体 3 ' の姿勢を推定する処理（ステップ S 1 0 3 ）を再度行っても構わない。

## 【 0 0 3 7 】

なお、画像を追加する際には、どのような姿勢の較正物体 3 を、撮影した画像を追加しても構わない。例えば、既に入力されている画像群と比較し、同じ較正物体 3 であって画像上の較正物体 3 の大きさが大きく異なるような画像を追加しても構わないし、同じ較正物体 3 であって画像上の較正物体 3 の大きさは同じだが形状が異なるような画像を追加しても構わない。前者は、既に入力されている画像と比較して、画像を撮影したカメラから較正物体 3 までの距離が異なるような画像であることを意味する。このような画像を入力することで、より長い経路で光線の直進性を考慮したキャリブレーションが可能となる。一方、後者の画像は、より狭い空間での光線の直進性を考慮した、より頑健なキャリブレーションを行うことが可能となる。

10

## 【 0 0 3 8 】

なお、新たな画像を追加する際に、過去に取得した画像群を全て蓄積しておくのではなく、画像を入れ替えて画像の総数は変化しないようにしても構わない。画像の総数を一定に保つことで、必要なメモリ量や演算量を一定に保つことが可能となる。

## 【 0 0 3 9 】

上記の説明では、画像入力部 1 1 より、入力された画像をすべて用いてキャリブレーション処理が行われるが、入力された画像のうち一部のみを選択して使用するようにしても構わない。例えば、画像入力部 1 1 より、入力された画像群に基づいて、カメラ 1 から較正物体 3 までの距離が大きく変化するような画像群を選択するようにしても構わないし、カメラ 1 から較正物体 3 までの距離は同程度で較正物体 3 の姿勢が大きく変化するような画像群を選択するようにしても構わない。

20

## 【 0 0 4 0 】

なお、カメラ 1 から較正物体 3 までの距離や較正物体 3 の姿勢に関する情報を正確に得るためにはキャリブレーションを実施する必要がある。それらの情報は別途与えられても構わないし、画像から推定するようにしても構わない。例えば、画像上の較正物体の大きさをを用いて、カメラから較正物体までの距離を推定しても構わないし、画像上での較正物体の形状を比較することで較正物体の姿勢の類似性を推定しても構わない。例えば、対応関係取得部 1 2 は、カメラ 1 から較正物体 3 までの距離の推定方法として、較正物体 3 を撮影した画像に対して、較正物体 3 が撮影されている領域の割合にしたがって、カメラ 1 から較正物体 3 までの距離を推定する。また、対応関係取得部 1 2 は、較正物体 3 を撮影した画像群に対して、較正物体 3 の撮影されている領域の形状の違いにしたがって、カメラ 1 に対する較正物体 3 の姿勢の類似度を推定する。次に、対応関係取得部 1 2 は、推定した距離、類似度に基づいて、カメラ 1 からの距離の違いが少なく、カメラ 1 に対する姿勢が異なる較正物体 3 を撮影した 3 枚以上の画像群を選択する。

30

## 【 0 0 4 1 】

（第 2 の実施形態）

次に、第 2 の実施形態として、複数のカメラ間の関係を求めるキャリブレーションについて説明する。具体的には、2 つのカメラ間の相対的な位置関係を推定し、各画素にマッピングされた光線に対して、カメラ間で共通の座標系を用いた記述を求めるキャリブレーション（外部キャリブレーション）について説明する。

40

## 【 0 0 4 2 】

図 4 は、第 2 の実施形態におけるカメラキャリブレーションを行う撮影空間を示す図である。図 4 に示すように、複数のカメラ 1 a ~ 1 c と、被写体となる較正物体 3 a、3 a'、3 b、3 b' との間に未知の屈折層 2 が存在している。較正物体 3 a、3 a'、3 b、3 b' は、異なる時刻に設置されていて、1 度には 1 つの較正物体しか存在しないもの

50

とする。例えば、較正物体 3 a' は、較正物体 3 a の姿勢が変更されたものであり、同様に、較正物体 3 b' は、較正物体 3 b の姿勢が変更されたものである。なお、較正物体 3 a、較正物体 3 b は、異なる物体であっても同じ物体であってもよい。また、較正物体 3 a、3 b として、どのような物体を用いても構わないが、画素と較正物体上の位置との対応関係が得られるものを使う必要がある。本実施形態における較正物体 3 a、較正物体 3 b は、グレイコードを表示する平面ディスプレイなどが用いられる。

#### 【0043】

なお、複数のカメラ 1 a ~ 1 c に共通の座標系を用いた記述による光線と画素のマッピングを求める最も簡単な方法として、以下の方法が考えられる。まず、複数のカメラ 1 a ~ 1 c の各々は、第 1 の実施形態に示した第 1 キャリブレーション装置 1 0 の構成を有する。そして、複数のカメラ 1 a ~ 1 c に対して、同じ較正物体の画像群を入力し、同じ画像の較正物体の姿勢を基準として光線を記述し、画素とのマッピングを求める方法である。本実施形態では、そのような方法がつかえないカメラ間においても、共通の座標系を用いた記述による光線と画素のマッピングを求める方法について説明する。

10

#### 【0044】

上記最も簡単な方法が適用できない撮影空間として、例えば、図 4 に示される撮影空間がある。図 4 の撮影空間では、カメラ 1 a とカメラ 1 b は、共通の較正物体 3 a を用いて光線記述と画素からのマッピングを求めることが可能であり、カメラ 1 b とカメラ 1 c は、共通の較正物体 3 b を用いて光線記述と画素からのマッピングを求めることが可能である。しかし、カメラ 1 a とカメラ 1 c は、共通の較正物体を撮影することができない状況である。本実施形態では、このような図 4 に示される撮影空間に対して、3 つのカメラ 1 a ~ 1 c で共通の座標系を用いた記述による光線と画素のマッピングを求める方法を説明する。

20

#### 【0045】

図 5 は、第 2 の実施形態における第 2 キャリブレーション装置の構成を示すブロック図である。図 5 に示すように、第 2 キャリブレーション装置 2 0 は、光線情報入力部 2 1 と、光線情報記憶部 2 2 と、カメラ位置情報推定部 2 3 と、光線記述変換部 2 4 とを備えている。

光線情報入力部 2 1 は、カメラの画素ごとに対応付けられた光線の情報（以下、光線情報とする。）を入力する。光線情報記憶部 2 2 は、入力されたカメラの画素ごとに対応付けられた光線情報を記憶する。カメラ位置情報推定部 2 3 は、光線情報を用いてカメラの位置関係を推定する。光線記述変換部 2 4 は、得られたカメラの位置関係に基づいて、光線に対して共通の座標系で表現した記述を求める。

30

#### 【0046】

次に、第 2 の実施形態における第 2 キャリブレーション装置 2 0 の動作を説明する。図 6 は、第 2 の実施形態における第 2 キャリブレーション装置 2 0 の動作を示すフローチャートである。

まず、光線情報入力部 2 1 は、カメラ対（カメラ 1 a とカメラ 1 b 又はカメラ 1 b とカメラ 1 c）に対して、カメラの画素ごとに対応付けられた光線情報を入力し、光線情報記憶部 2 2 に記憶する（ステップ S 2 0 1）。ここで、カメラ対ごとに入力される光線情報は、共通の座標系で記述されている。

40

#### 【0047】

なお、カメラ対ごとに共通の座標系で記述された光線情報を求める方法は、どのような方法であってもよい。例えば、第 1 の実施形態で示した第 1 キャリブレーション装置 1 0 を用いて、同じ較正物体の画像群を入力し、同じ画像の較正物体の姿勢を基準として、各カメラにおける画素と光線のマッピングを求めることで、共通の座標系で記述された光線情報を求めることができる。

#### 【0048】

つまり、本実施形態においては、光線情報入力部 2 1 は、カメラ 1 a とカメラ 1 b に対して共通の座標系で記述された光線と画素とをマッピングする光線情報を入力して、カメ

50

ラ 1 b とカメラ 1 c に対して共通の座標系で記述された光線と画素とをマッピングする光線情報を入力する。

【 0 0 4 9 】

次に、カメラ位置情報推定部 2 3 は、複数の異なる座標系で表現された光線の記述が与えられた画素の集合  $\{ p_k \mid k = 1, \dots, \text{numCPixs} \}$  を求める (ステップ S 2 0 2)。この画素の集合は、カメラ 1 b の画素のうち、カメラ 1 a と共通の座標系で表された光線  $l_{12}(k)$  へのマッピングを持つ画素の集合と、カメラ 1 c と共通の座標系であらわされた光線  $l_{23}(k)$  へのマッピングを持つ画素の集合とを含む。ここで画素  $p_k$  に対応するカメラ 1 a と共通の座標系で表された光線を  $l_{12}(k)$ 、カメラ 1 c と共通の座標系で表された光線を  $l_{23}(k)$  で表す。

10

【 0 0 5 0 】

次に、普通の座標系での光線記述が与えられた画素の集合が得られたら、カメラ位置情報推定部 2 3 は、それら座標系間の関係を推定する (ステップ S 2 0 3)。具体的には、下記の (式 9) を満たす回転行列  $R$  と並進ベクトル  $t$  を求める。なお、この (式 9) では、カメラ 1 a の光線が与えられた座標系を基準としているが、カメラ 1 c の光線が与えられた座標系を基準としても構わない。

【数 8】

$$l_{12}(k) = Rl_{23}(k) + t \quad \dots \text{(式 9)}$$

20

【 0 0 5 1 】

回転行列  $R$  と並進ベクトル  $t$  はどのような方法を用いて求めても構わないが、例えば、参考文献 (B. Kamgar-Parsi and B. Kamgar-Parsi, "Algorithms for matching 3D line sets," TPAMI, vol.26, No. 5, pp.582 - 593, May 2004) の方法を用いて求めることができる。この時、全ての  $p_k$  について上記 (式 9) を満たす回転行列と並進ベクトルを求めても構わない。しかし、画素の点数が多い場合、演算量が膨大になるほか、誤った光線の情報が含まれていた場合、その影響を受けて推定の精度が低下する。そのため、ステップ S 2 0 3 では一部の画素のみを用いて推定するようにしても構わない。

【 0 0 5 2 】

30

一部の画素のみを用いて推定を行った場合、推定された回転行列と並進ベクトルの推定精度を求める。どのような方法を用いて推定精度を表現しても構わない。例えば、推定された回転行列と並進ベクトルを用いて、カメラ 1 c と共通の座標系で表現されていた較正物体 3 b 上の点  $q_i(k)$  を下記の (式 10) によって変換して得られる点  $q'_i(k)$  と光線  $l_{12}(k)$  との距離の和や最大値、分散を用いても構わない。また、 $q'_i(k)$  と光線  $l_{12}(k)$  との較正物体上での距離の和や最大値、分散を用いても構わない。

【数 9】

$$q'_i(k) = Rq_i(k) + t \quad \dots \text{(式 10)}$$

40

【 0 0 5 3 】

さらに、カメラ 1 a と共通の座標系で表現されていた較正物体 3 a 上の点  $s_j(k)$  を下記の (式 11) によって変換して得られる点  $s'_j(k)$  と光線  $l_{23}(k)$  との距離の和や最大値、分散を用いても構わないし、 $s'_j(k)$  と光線  $l_{23}(k)$  との較正物体上での距離の和や最大値、分散を用いても構わない。

【数 1 0】

$$s'_j(k) = R^{-1}s_j(k) - R^{-1}t \quad \dots \text{(式 1 1)}$$

なお、得られた推定精度が予め定めた閾値を超えていない場合は、別の画素の集合を用いて回転行列と並進ベクトルの推定をやり直す。

【0 0 5 4】

次に、回転行列と並進ベクトルの推定が終了したら、光線記述変換部 2 4 は、得られた回転行列と並進ベクトルを用いて、光線の記述を変換することで、共通の座標系における光線と画素のマッピングを生成して出力する（ステップ S 2 0 4）。具体的には、以下の（式 1 2）にしたがって、カメラ 1 c と共通の座標系で表された光線群  $\{l_{23}(m)\}$  に対して、カメラ 1 a と共通の座標系で表した光線群  $\{l_{12}(m)\}$  を求めることで変換が行われる。

10

【数 1 1】

$$l_{12}(m) = Rl_{23}(m) + t \quad \dots \text{(式 1 2)}$$

【0 0 5 5】

20

(ハードウェアの構成例)

図 7 は、第 1 の実施形態における第 1 キャリブレーション装置 1 0 又は第 2 の実施形態における第 2 キャリブレーション装置 2 0 のハードウェアの構成例を示す図である。

図 7 に示すように、第 1 キャリブレーション装置 1 0 又は第 2 キャリブレーション装置 2 0 を、コンピュータによって構成する場合のハードウェア構成を示すブロック図である。第 1 キャリブレーション装置 1 0 又は第 2 キャリブレーション装置 2 0 は、プログラムを実行する CPU (Central Processing Unit) 1 0 0 と、CPU 1 0 0 がアクセスするプログラムやデータが格納される RAM 等のメモリ 1 0 1 と、カメラ等からの処理対象の画像信号を入力する画像入力部 1 0 2 と、カメラキャリブレーション処理を CPU 1 0 0 に実行させるソフトウェアプログラムであるカメラキャリブレーションプログラム 1 0 5 が格納されたプログラム記憶装置 1 0 3 と、CPU 1 0 0 がメモリ 1 0 1 にロードされたカメラキャリブレーションプログラム 1 0 5 を実行することにより生成された画素と光線の対応関係を出力する光線情報出力部 1 0 4 とが、バスで接続された構成になっている。

30

【0 0 5 6】

なお、画像入力部 1 0 2 は、ディスク装置等により画像信号を記憶し、記憶した画像信号を読み出すことで画像信号を入力する記憶部で構成してもよい。また、光線情報出力部 1 0 4 は、ディスク装置等により画素と光線の対応関係を示す光線情報を記憶する記憶部で構成してもよい。また、バスで接続された CPU やメモリや補助記憶装置などを備え、カメラキャリブレーションプログラムを実行することによってカメラキャリブレーションを備える装置として機能する。なお、カメラキャリブレーションの各機能の全て又は一部は、ASIC (Application Specific Integrated Circuit) や PLD (Programmable Logic Device) や FPGA (Field Programmable Gate Array) 等のハードウェアを用いて実現されてもよい。カメラキャリブレーションプログラムは、コンピュータ読み取り可能な記録媒体に記録されてもよい。コンピュータ読み取り可能な記録媒体とは、例えばフレキシブルディスク、光磁気ディスク、ROM、CD-ROM 等の可搬媒体、コンピュータシステムに内蔵されるハードディスク等の記憶装置である。カメラキャリブレーションプログラムは、電気通信回線を介して送信されてもよい。

40

【0 0 5 7】

このように、第 1 の実施形態における第 1 キャリブレーション装置 1 0 又は第 2 の実施形態における第 2 キャリブレーション装置 2 0 を、コンピュータで実現することができる

50

。その場合、この機能を実現するためのプログラムをコンピュータ読み取り可能な記録媒体に記録して、この記録媒体に記録されたプログラムをコンピュータシステムに読み込ませ、実行することによって実現してもよい。なお、ここでいう「コンピュータシステム」とは、OSや周辺機器等のハードウェアを含むものとする。また、「コンピュータ読み取り可能な記録媒体」とは、フレキシブルディスク、光磁気ディスク、ROM、CD-ROM等の可搬媒体、コンピュータシステムに内蔵されるハードディスク等の記憶装置のことをいう。さらに「コンピュータ読み取り可能な記録媒体」とは、インターネット等のネットワークや電話回線等の通信回線を介してプログラムを送信する場合の通信線のように、短時間の間、動的にプログラムを保持するもの、その場合のサーバやクライアントとなるコンピュータシステム内部の揮発性メモリのように、一定時間プログラムを保持しているものも含んでもよい。また上記プログラムは、前述した機能の一部を実現するためのものであっても良く、さらに前述した機能をコンピュータシステムにすでに記録されているプログラムとの組み合わせで実現できるものであってもよく、PLD(Programmable Logic Device)やFPGA(Field Programmable Gate Array)等のハードウェアを用いて実現されるものであってもよい。

10

#### 【0058】

以上説明したように、光線が撮影空間中で直進することを利用して、複数の姿勢で同一の較正物体を撮影した画像群から、画素と光線の対応関係を生成することにより、カメラと被写体との間に任意の屈折層(未知の屈折層または複雑な形状の屈折層)を含む場合においても、カメラのキャリブレーションを実現することができる。また、カメラと被写体との間に屈折層を含まない空間を通して、被写体を撮影不可能な状況においても、カメラのキャリブレーションを実現することができる。

20

#### 【0059】

以上、この発明の実施形態について図面を参照して詳述してきたが、具体的な構成はこの実施形態に限られるものではなく、この発明の要旨を逸脱しない範囲の設計等も含まれる。

#### 【産業上の利用可能性】

#### 【0060】

本発明のカメラキャリブレーション装置、カメラキャリブレーション方法、カメラキャリブレーションプログラム及び記録媒体は、カメラと被写体との間に未知の屈折層がある場合においても、画素と光線とを対応付けを行うことが不可欠な用途に適用できる。

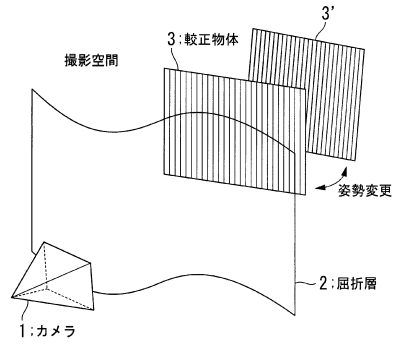
30

#### 【符号の説明】

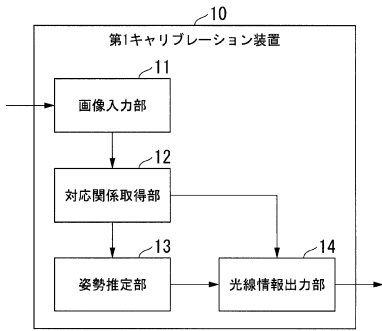
#### 【0061】

1、1 a、1 b、1 c ...カメラ、 2 ...屈折層、 3、3'、3 a、3 a'、3 b、3 b' ...較正物体、 1 0 ...第1キャリブレーション装置、 1 1 ...画像入力部、 1 2 ...対応関係取得部、 1 3 ...姿勢推定部、 1 4 ...光線情報出力部、 2 0 ...第2キャリブレーション装置、 2 1 ...光線情報入力部、 2 2 ...光線情報記憶部、 2 3 ...カメラ位置情報推定部、 2 4 ...光線記述変換部

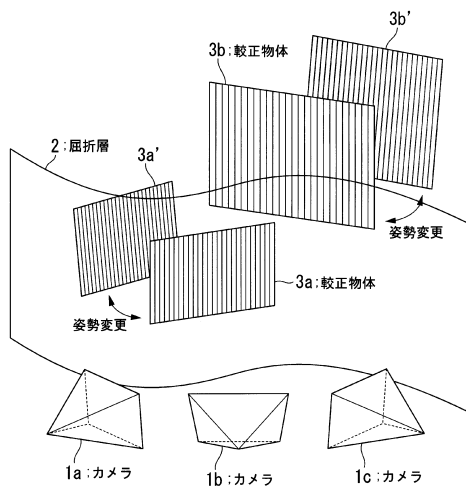
【図1】



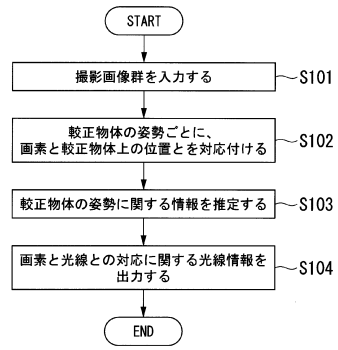
【図2】



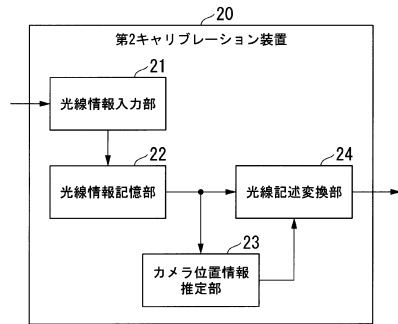
【図4】



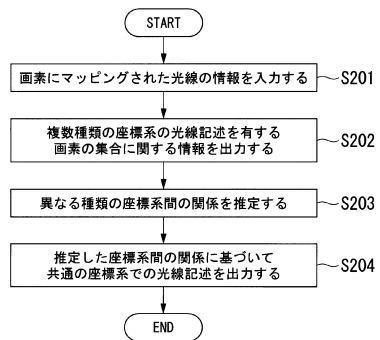
【図3】



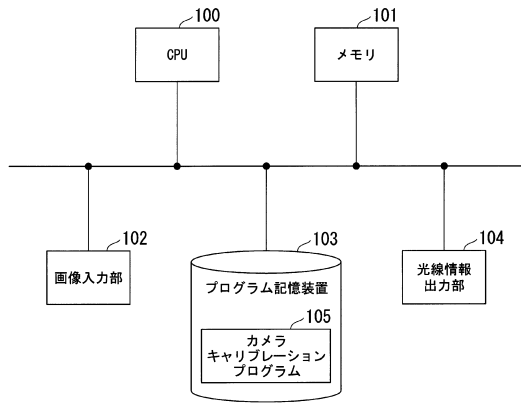
【図5】



【図6】



【図7】



---

フロントページの続き

- (72)発明者 西村 真衣  
京都府京都市左京区吉田本町3番地1 国立大学法人京都大学内
- (72)発明者 延原 章平  
京都府京都市左京区吉田本町3番地1 国立大学法人京都大学内
- (72)発明者 松山 隆司  
京都府京都市左京区吉田本町3番地1 国立大学法人京都大学内

審査官 徳田 賢二

- (56)参考文献 特開2008-070347(JP,A)  
Peter Sturm and Srikumar Ramalingam, A Generic Concept for Camera Calibration, Proc. 8th European Conference on Computer Vision (ECCV '04), Springer-Verlag, 2004年5月, pp. 1-13

- (58)調査した分野(Int.Cl., DB名)
- |      |         |
|------|---------|
| H04N | 5 / 232 |
| G06T | 3 / 00  |