

(12) 特許協力条約に基づいて公開された国際出願

(19) 世界知的所有権機関
国際事務局

(43) 国際公開日
2020年10月15日(15.10.2020)



(10) 国際公開番号

WO 2020/208686 A1

(51) 国際特許分類:
G01B 11/00 (2006.01)

(21) 国際出願番号: PCT/JP2019/015330

(22) 国際出願日: 2019年4月8日(08.04.2019)

(25) 国際出願の言語: 日本語

(26) 国際公開の言語: 日本語

(71) 出願人: 日本電気株式会社 (NEC CORPORATION) [JP/JP]; 〒1088001 東京都港区芝五丁目7番1号 Tokyo (JP).

(72) 発明者: 中野 学 (NAKANO Gaku); 〒1088001 東京都港区芝五丁目7番1号 日本電気株式会社内 Tokyo (JP).

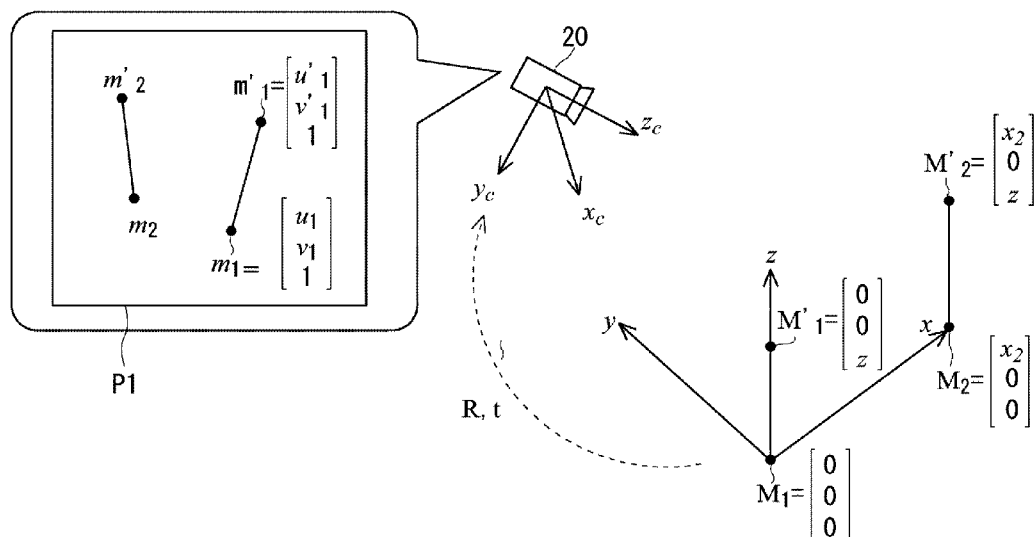
(74) 代理人: 家入 健 (IEIRI Takeshi); 〒2210835 神奈川県横浜市神奈川区鶴屋町三丁目3番8 アサヒビルディング5階 響国際特許事務所 Kanagawa (JP).

(81) 指定国(表示のない限り、全ての種類の国内保護が可能): AE, AG, AL, AM, AO, AT, AU, AZ, BA, BB, BG, BH, BN, BR, BW, BY, BZ, CA, CH, CL, CN, CO, CR, CU, CZ, DE, DJ, DK, DM, DO, DZ, EC, EE, EG, ES, FI, GB, GD, GE, GH, GM, GT, HN, HR, HU, ID, IL, IN, IR, IS, JO, JP, KE, KG, KH, KN, KP, KR, KW, KZ, LA, LC, LK, LR, LS, LU, LY, MA, MD, ME, MG, MK, MN, MW, MX, MY, MZ, NA, NG, NI, NO, NZ, OM, PA, PE, PG, PH, PL, PT, QA, RO, RS, RU, RW, SA, SC, SD, SE, SG, SK, SL,

(54) Title: CAMERA CALIBRATION DEVICE, CAMERA CALIBRATION METHOD, AND NON-TRANSITORY COMPUTER-READABLE MEDIUM HAVING PROGRAM STORED THEREON

(54) 発明の名称: カメラ校正装置、カメラ校正方法、及びプログラムが格納された非一時的なコンピュータ可読媒体

[図3]



(57) Abstract: In this camera calibration device (10), an acquisition unit (11) acquires a first intra-image-plane normal vector and a second intra-image-plane normal vector respectively corresponding to a first intra-world-coordinate-space normal vector and a second intra-world-coordinate-space normal vector that are normal vectors to a reference plane in a

SM, ST, SV, SY, TH, TJ, TM, TN, TR, TT, TZ, UA,
UG, US, UZ, VC, VN, ZA, ZM, ZW.

- (84) 指定国(表示のない限り、全ての種類の広域保護が可能): ARIPO (BW, GH, GM, KE, LR, LS, MW, MZ, NA, RW, SD, SL, ST, SZ, TZ, UG, ZM, ZW), ユーラシア (AM, AZ, BY, KG, KZ, RU, TJ, TM), ヨーロッパ (AL, AT, BE, BG, CH, CY, CZ, DE, DK, EE, ES, FI, FR, GB, GR, HR, HU, IE, IS, IT, LT, LU, LV, MC, MK, MT, NL, NO, PL, PT, RO, RS, SE, SI, SK, SM, TR), OAPI (BF, BJ, CF, CG, CI, CM, GA, GN, GQ, GW, KM, ML, MR, NE, SN, TD, TG).

添付公開書類:

- 一 国際調査報告 (条約第21条(3))

world coordinate space and have the same length. A projective depth calculation unit (12) calculates a projective depth vector having, as vector elements, four projective depths respectively corresponding to the starting point and ending point of the first intra-image-plane normal vector and the starting point and ending point of the second intra-image-plane normal vector.

(57) 要約: カメラ校正装置 (10) にて取得部 (11) は、それぞれが世界座標空間における基準平面に対する法線ベクトルであり且つ互いに同じ長さを有する第1世界座標空間内法線ベクトル及び第2世界座標空間内法線ベクトルにそれぞれ対応する、第1画像平面内法線ベクトル及び第2画像平面内法線ベクトルを取得する。射影的奥行き算出部 (12) は、第1画像平面内法線ベクトルの始点及び終点並びに第2画像平面内法線ベクトルの始点及び終点にそれぞれ対応する4つの射影的奥行きをベクトル要素とする射影的奥行きベクトルを算出する。

明 細 書

発明の名称：

カメラ校正装置、カメラ校正方法、及びプログラムが格納された非一時的なコンピュータ可読媒体

技術分野

[0001] 本開示は、カメラ校正装置、カメラ校正方法、及びプログラムが格納された非一時的なコンピュータ可読媒体に関する。

背景技術

[0002] 複数のカメラで構成された多視点カメラシステムを用いて3次元的な画像解析を行うために、カメラの光学的な特性及びカメラ同士の位置関係を明らかにすることが必要である。光学的な特性は、個々のカメラごとに固有なパラメータであり、例えば焦点距離、レンズ歪、光学中心座標などを指し、総称して「内部パラメータ」と呼ばれる。内部パラメータは、ズーム値変更や異なるレンズに交換しない限り不変である。また、カメラ同士の位置関係を表すパラメータは、回転行列及び並進ベクトルを指し、「外部パラメータ」と呼ばれる。外部パラメータは、3次元座標の原点に対してカメラを動かさない限り不変である。これら内部パラメータ及び外部パラメータが既知であれば、画像上での被写体の大きさや長さを物理的な距離（例えばメートル）に変換したり、被写体の3次元形状を復元したりすることが可能となる。これらの内部パラメータ及び外部パラメータの一方もしくは両方を計算することは、「カメラ校正（カメラキャリブレーション）」と呼ばれる。また、内部パラメータ及び外部パラメータの一方を、又は、これらの両方を区別することなく、単に「カメラパラメータ」と呼ぶことがある。

[0003] カメラパラメータを算出する種々の方法が提案されている。例えば、単眼カメラの内部パラメータを算出する方法として、Z. Zhangにより考案された平面の校正ボードを用いる方法が広く知られている。また、特許文献1では、Zhangの方法のように3次元座標が既知の平面校正物体を用いてカメラ校正

を行う方法が提案されている。

[0004] また、特許文献2では、画像から水平面に垂直な線分を検出し、検出した複数の垂直線分を仮想平面に投影し、仮想平面上での各線分の平行性を最小化する評価関数を用いて回転行列（つまり、内部パラメータ）を算出する方法が提案されている。

先行技術文献

特許文献

[0005] 特許文献1：国際公開第2015／045834号

特許文献2：特許第6011548号公報

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、Zhangの方法及び特許文献1に開示されている方法では、3次元座標が平面上に分布している点として既定されており、画像処理により各点の3次元座標を取得して、外部パラメータを計算する。高精度にカメラ校正を行うためには、画面の中央や一部のみに対応点が偏在することなく、画面全体に満遍なく3次元座標が観測されることが望ましいことが広く知られている。しかしながら、広域の環境を観測するカメラを校正するためには、巨大な平面校正物体が必要なため、事実上校正が不可能であるか、又は、可能であったとしても利便性が良くない可能性がある。

[0007] また、特許文献2に開示されている方法では、内部パラメータが既知であることを前提としているため、事前にZhangの方法等を利用する必要がある。そのため、上記の通り、事実上校正が不可能であるか、又は、可能であったとしても利便性が良くない可能性がある。

[0008] 本開示の目的は、より簡便な方法で内部パラメータ及び外部パラメータを算出することができる、カメラ校正装置、カメラ校正方法、及びプログラムが格納された非一時的なコンピュータ可読媒体を提供することにある。

課題を解決するための手段

[0009] 第1の態様にかかるカメラ校正装置は、カメラによって世界座標空間が撮影された画像の画像平面において、それぞれが前記世界座標空間における基準平面に対する法線ベクトルであり且つ互いに同じ長さを有する第1世界座標空間内法線ベクトル及び第2世界座標空間内法線ベクトルにそれぞれ対応する、第1画像平面内法線ベクトル及び第2画像平面内法線ベクトルを取得する取得部と、

前記第1画像平面内法線ベクトルの第1始点及び第1終点並びに前記第2画像平面内法線ベクトルの第2始点及び第2終点にそれぞれ対応する4つの射影的奥行きをベクトル要素とする射影的奥行きベクトルを算出する、射影的奥行き算出部と、

前記算出された射影的奥行きベクトルと、前記第1始点及び第1終点にそれぞれ対応する第1画像平面内始点ベクトル及び第1画像平面内終点ベクトル並びに前記第2始点及び前記第2終点にそれぞれ対応する第2画像平面内始点ベクトル及び第2画像平面内終点ベクトルとに基づいて、前記カメラの内部パラメータ及び外部パラメータを算出する、カメラパラメータ算出部と、

を具備する。

[0010] 第2の態様にかかるカメラ校正方法は、カメラによって世界座標空間が撮影された画像の画像平面において、それぞれが前記世界座標空間における基準平面に対する法線ベクトルであり且つ互いに同じ長さを有する第1世界座標空間内法線ベクトル及び第2世界座標空間内法線ベクトルにそれぞれ対応する、第1画像平面内法線ベクトル及び第2画像平面内法線ベクトルを取得し、

前記第1画像平面内法線ベクトルの第1始点及び第1終点並びに前記第2画像平面内法線ベクトルの第2始点及び第2終点にそれぞれ対応する4つの射影的奥行きをベクトル要素とする射影的奥行きベクトルを算出し、

前記算出された射影的奥行きベクトルと、前記第1始点及び第1終点にそれぞれ対応する第1画像平面内始点ベクトル及び第1画像平面内終点ベクトル

ル並びに前記第2始点及び前記第2終点にそれぞれ対応する第2画像平面内始点ベクトル及び第2画像平面内終点ベクトルとに基づいて、前記カメラの内部パラメータ及び外部パラメータを算出する。

[0011] 第3の態様にかかる非一時的なコンピュータ可読媒体は、カメラによって世界座標空間が撮影された画像の画像平面において、それぞれが前記世界座標空間における基準平面に対する法線ベクトルであり且つ互いに同じ長さを有する第1世界座標空間内法線ベクトル及び第2世界座標空間内法線ベクトルにそれぞれ対応する、第1画像平面内法線ベクトル及び第2画像平面内法線ベクトルを取得し、

前記第1画像平面内法線ベクトルの第1始点及び第1終点並びに前記第2画像平面内法線ベクトルの第2始点及び第2終点にそれぞれ対応する4つの射影的奥行きをベクトル要素とする射影的奥行きベクトルを算出し、

前記算出された射影的奥行きベクトルと、前記第1始点及び第1終点にそれぞれ対応する第1画像平面内始点ベクトル及び第1画像平面内終点ベクトル並びに前記第2始点及び前記第2終点にそれぞれ対応する第2画像平面内始点ベクトル及び第2画像平面内終点ベクトルとに基づいて、前記カメラの内部パラメータ及び外部パラメータを算出する、

処理を、カメラ校正装置に実行させるプログラムが格納している。

発明の効果

[0012] 本開示により、より簡便な方法で内部パラメータ及び外部パラメータを算出することができる、カメラ校正装置、カメラ校正方法、及びプログラムが格納された非一時的なコンピュータ可読媒体を提供することができる。

図面の簡単な説明

[0013] [図1]第1実施形態におけるカメラ校正装置の一例を示すブロック図である。
[図2]第2実施形態におけるカメラシステムの一例を示すブロック図である。
[図3]カメラ座標系と世界座標系との関係の説明に供する図である。
[図4]第2実施形態におけるカメラ校正装置の処理動作の一例を示すフローチャートである。

[図5]第3実施形態におけるカメラ校正装置の一例を示すブロック図である。

[図6]第3実施形態におけるカメラ校正装置の処理動作の一例を示すフローチャートである。

[図7]第4実施形態におけるカメラ校正装置の一例を示すブロック図である。

[図8]第4実施形態におけるカメラ校正装置の処理動作の一例を示すフローチャートである。

[図9]カメラ校正装置のハードウェア構成例を示す図である。

発明を実施するための形態

[0014] 以下、図面を参照しつつ、実施形態について説明する。なお、実施形態において、同一又は同等の要素には、同一の符号を付し、重複する説明は省略される。

[0015] <第1実施形態>

図1は、第1実施形態におけるカメラ校正装置の一例を示すブロック図である。図1においてカメラ校正装置10は、取得部11と、射影的奥行き算出部12と、カメラパラメータ算出部13とを有している。

[0016] 取得部11は、カメラ（不図示）によって「世界座標空間」が撮影された画像の「画像平面」において、複数の「画像平面内法線ベクトル」を取得する。複数の「画像平面内法線ベクトル」は、「世界座標空間」における「基準平面」に対する複数の「世界座標空間内法線ベクトル」にそれぞれ対応する。「世界座標空間」は、世界座標系によって規定される空間である。「基準平面」は、例えば地面又は床等の水平面であってもよい。また、「世界座標空間内法線ベクトル」は、例えば上記の水平面に対して垂直に延びる、ビル又は棚等の辺であってもよい。

[0017] ここで、取得部11によって取得される複数の「画像平面内法線ベクトル」は、同じ長さを有する2つの世界座標空間内法線ベクトルにそれぞれ対応する、2つの画像平面内法線ベクトルを含む。以下では、同じ長さを有する2つの世界座標空間内法線ベクトルを、「第1世界座標空間内法線ベクトル」及び「第2世界座標空間内法線ベクトル」と呼ぶことがある。また、「第

「第1世界座標空間内法線ベクトル」及び「第2世界座標空間内法線ベクトル」にそれぞれ対応する2つの画像平面内法線ベクトルを、「第1画像平面内法線ベクトル」及び「第2画像平面内法線ベクトル」と呼ぶことがある。

[0018] 射影的奥行き算出部12は、第1画像平面内法線ベクトルの始点及び終点並びに第2画像平面内法線ベクトルの始点及び終点にそれぞれ対応する4つの「射影的奥行き」をベクトル要素とする「射影的奥行きベクトル」を算出する。以下では、第1画像平面内法線ベクトルの始点及び終点を、「第1始点」及び「第1終点」と呼ぶことがある。また、第2画像平面内法線ベクトルの始点及び終点を、「第2始点」及び「第2終点」と呼ぶことがある。

[0019] すなわち、射影的奥行き算出部12は、上記カメラから、第1始点の3次元座標に対する、射影的奥行きを算出する。第1終点、第2始点、及び、第2終点についても、同様に、射影的奥行きを算出する。すなわち、「射影的奥行き」とは、射影空間における上記カメラから見た3次元座標までの奥行きを意味する。

[0020] 例えば、射影的奥行き算出部12は、射影的奥行きベクトルが、第1画像平面内始点ベクトル、第1画像平面内終点ベクトル、第2画像平面内始点ベクトル、及び第2画像平面内終点ベクトルを行列要素とする「第1行列」の「ゼロ空間」である、関係に基づいて、射影的奥行きベクトルを算出する。

[0021] カメラパラメータ算出部13は、上記カメラの内部パラメータ及び外部パラメータを算出する。この算出は、射影的奥行き算出部12にて算出された射影的奥行きベクトルと、「第1画像平面内始点ベクトル」、「第1画像平面内終点ベクトル」、「第2画像平面内始点ベクトル」、及び「第2画像平面内終点ベクトル」とに基づいて行われる。「第1画像平面内始点ベクトル」及び「第1画像平面内終点ベクトル」は、第1始点及び第1終点にそれぞれ対応し、「第2画像平面内始点ベクトル」及び「第2画像平面内終点ベクトル」は、第2始点及び第2終点にそれぞれ対応する。

[0022] 以上のように第1実施形態によれば、カメラ校正装置10にて取得部11は、それぞれが世界座標空間における基準平面に対する法線ベクトルであり

且つ互いに同じ長さを有する第1世界座標空間内法線ベクトル及び第2世界座標空間内法線ベクトルにそれぞれ対応する、第1画像平面内法線ベクトル及び第2画像平面内法線ベクトルを取得する。射影的奥行き算出部12は、第1画像平面内法線ベクトルの始点及び終点並びに第2画像平面内法線ベクトルの始点及び終点にそれぞれ対応する4つの射影的奥行きをベクトル要素とする射影的奥行きベクトルを算出する。

[0023] このカメラ校正装置10の構成により、射影的奥行きベクトルを算出することができるので、校正ボードを用いることなく、内部パラメータ及び外部パラメータを算出することができる。すなわち、より簡便な方法で内部パラメータ及び外部パラメータを算出することができる。

[0024] <第2実施形態>

第2実施形態は、より具体的な実施形態に関する。

[0025] <カメラシステムの概要>

図2は、第2実施形態におけるカメラシステムの一例を示すブロック図である。図2においてカメラシステム1は、カメラ20と、画像供給装置30と、カメラ校正装置40とを有している。

[0026] カメラ20は、「世界座標系」における撮影対象エリアを撮影して画像P1を形成する。

[0027] ここで、カメラ20の「カメラ座標系」と「世界座標系」との関係について説明する。図3は、カメラ座標系と世界座標系との関係の説明に供する図である。

[0028] 世界座標系の原点は、第1世界座標空間内法線ベクトルの始点(M_1)と一致している。また、第1世界座標空間内法線ベクトルの終点(M'_1)は、世界座標系のz軸上に位置している。また、第2世界座標空間内法線ベクトルの始点(M_2)は、世界座標系のx軸上に位置している。すなわち、第1世界座標空間内法線ベクトルの始点(M_1)と第2世界座標空間内法線ベクトルの始点(M_2)とを結ぶ直線は、世界座標系のx軸と一致する。そして、x軸及びz軸の両方と直交する方向を、y軸としている。すなわち、上記の「基準

平面」は、世界座標系の x y 平面と一致する。ここで、第1世界座標空間内法線ベクトル及び第2世界座標空間内法線ベクトルの長さが同じなので、第1世界座標空間内法線ベクトルの終点(M'_1)及び第2世界座標空間内法線ベクトルの終点(M'_2)の z 座標は、共に「 z 」となっている。

[0029] なお、本実施形態では、世界座標系の3次元座標は明示的には与えられないため、世界座標系とカメラ座標系とは、相対的に等価であれば、任意に定義付けしてよい。そのため、図3に示すように、世界座標系及びカメラ座標系を設定しても、一般性は失われない。なお、図3において、 R は、回転ベクトルを表し、 t は、並進ベクトルを表している。すなわち、世界座標に対するカメラ20の位置及び姿勢は、回転行列 R 及び並進ベクトル t によって表される。

[0030] 図2の説明に戻り、画像供給装置30は、カメラ20にて形成された画像を取得して、取得した画像をカメラ校正装置40へ供給する。例えば、画像供給装置30は、取得した画像を、通信部(不図示)を介してカメラ校正装置40へ送信してもよい。該画像は、ある時刻の1枚の静止画でもよいし、時系列の連続した動画の各フレーム画像でもよいし、時系列の異なる複数の静止画でもよい。

[0031] <カメラ校正装置の構成例>

図2においてカメラ校正装置40は、取得部41と、射影的奥行き算出部42と、カメラパラメータ算出部43とを有している。カメラパラメータ算出部43は、内部パラメータ算出部43Aと、外部パラメータ算出部43Bとを有している。

[0032] 取得部41は、第1実施形態の取得部11と同様に、画像供給装置30から供給された画像の「画像平面」において、複数の「画像平面内法線ベクトル」を取得する。例えば、取得部41は、画像供給装置30から供給された画像において、ビル又は箱のような、地面と垂直に交わる又は接する人工物の線分を、画像処理により自動的に取得してもよい。又は、取得部41は、画像供給装置30から供給された動画における特定人物の追跡と関節検出と

を組み合わせることで各フレーム画像における背骨関節を法線ベクトルとして自動的に取得してもよい。又は、取得部41は、画像供給装置30から供給された画像に対してユーザが手動入力による「画像平面内法線ベクトル」の指定を受け付けてもよい。なお、第1実施形態で説明したように、取得部41によって取得される複数の「画像平面内法線ベクトル」は、同じ長さを有する「第1世界座標空間内法線ベクトル」及び「第2世界座標空間内法線ベクトル」にそれぞれ対応する、「第1画像平面内法線ベクトル」及び「第2画像平面内法線ベクトル」を含んでいる。

[0033] 射影的奥行き算出部42は、第1実施形態の射影的奥行き算出部12と同様に、第1画像平面内法線ベクトルの第1始点及び第1終点並びに第2画像平面内法線ベクトルの第2始点及び第2終点にそれぞれ対応する4つの「射影的奥行き」をベクトル要素とする「射影的奥行きベクトル」を算出する。なお、「射影的奥行きベクトル」の算出については、後に詳しく説明する。

[0034] 内部パラメータ算出部43Aは、射影的奥行き算出部42にて算出された射影的奥行きベクトルと、第1画像平面内始点ベクトル、第1画像平面内終点ベクトル、第2画像平面内始点ベクトル、及び第2画像平面内終点ベクトルとに基づいて、カメラ20の焦点距離 f を算出する。カメラ20の焦点距離 f は、内部パラメータの1つである。この焦点距離 f の算出では、例えば、回転行列 R の各2つの列ベクトルの間の直交関係が用いられる。なお、内部パラメータの算出については、後に詳しく説明する。

[0035] 外部パラメータ算出部43Bは、射影的奥行き算出部42にて算出された射影的奥行きベクトルと、第1画像平面内始点ベクトル、第1画像平面内終点ベクトル、第2画像平面内始点ベクトル、及び第2画像平面内終点ベクトルと、内部パラメータ算出部43Aにて算出された焦点距離 f とに基づいて、回転行列 R 及び並進ベクトル t を算出する。なお、外部パラメータの算出については、後に詳しく説明する。

[0036] <カメラ校正装置の動作例>

図4は、第2実施形態におけるカメラ校正装置の処理動作の一例を示すフ

ローチャートである。

[0037] 取得部41は、カメラ20で撮影された画像から、第1画像平面内法線ベクトル及び第2画像平面内法線ベクトルを取得する（ステップS11）。

[0038] 射影的奥行き算出部42は、第1画像平面内法線ベクトルの第1始点及び第1終点並びに第2画像平面内法線ベクトルの第2始点及び第2終点にそれぞれ対応する4つの「射影的奥行き」をベクトル要素とする「射影的奥行きベクトル」を算出する（ステップS12）。

[0039] 内部パラメータ算出部43Aは、ステップS12にて算出された射影的奥行きベクトルと、第1画像平面内始点ベクトル、第1画像平面内終点ベクトル、第2画像平面内始点ベクトル、及び第2画像平面内終点ベクトルとに基づいて、カメラ20の焦点距離 f を算出する（ステップS13）。

[0040] 外部パラメータ算出部43Bは、ステップS12にて射影的奥行き算出部42にて算出された射影的奥行きベクトルと、第1画像平面内始点ベクトル、第1画像平面内終点ベクトル、第2画像平面内始点ベクトル、及び第2画像平面内終点ベクトルと、ステップS13にて算出された焦点距離 f とに基づいて、回転行列 R 及び並進ベクトル t を算出する（ステップS14）。

[0041] ここで、射影的奥行きベクトル、内部パラメータ、及び外部パラメータの算出について具体例を用いて詳しく説明する。以下では、図3に示した記号を用いる。すなわち、世界座標系の原点は、第1世界座標空間内法線ベクトルの始点 $M_1 = [0, 0, 0]^T$ と一致している。第1世界座標空間内法線ベクトルの終点 M'_1 は、世界座標系の z 軸上に位置しており、 $M'_1 = [0, 0, 0]^T$ である。 x 軸は、始点 M_1 と第2世界座標空間内法線ベクトルの始点 M_2 ($M_2 = [x_2, 0, 0]^T$) とを結ぶ直線と一致する。カメラ20は、世界座標系の原点から回転行列 R 、並進ベクトル t の位置にある。また、 i 番目の世界座標空間内法線ベクトルの始点 $M_i = [x_i, 0, 0]^T$ 及び終点 $M'_i = [x_i, 0, z]^T$ は、それぞれ、画像平面上では、 $m_i = [u_i, v_i, 1]^T$ 及び $m'_i = [u'_i, v'_i, 1]^T$ として観測されている。 m_i 及び m'_i は、斉次座標系で表されている。また、上添え字の T は、ベクトル又は行

列の転置を表している。ここで、カメラ20がデジタルカメラである場合には、スキューがなく、また、光学中心を画像中心とほぼ近似できるため、未知の内部パラメータは、焦点距離 f とする。

[0042] まず、解くべき問題の定義を行うことにする。

[0043] 第 i 世界座標空間内法線ベクトルの始点及び終点は、式 (1) を用いて、3次元空間から画像座標へ射影することができる。

[数1]

$$\left. \begin{aligned} \lambda_i \mathbf{m}_i &= \mathbf{K}(\mathbf{R}\mathbf{M}_i + \mathbf{t}) \\ \lambda'_i \mathbf{m}'_i &= \mathbf{K}(\mathbf{R}\mathbf{M}'_i + \mathbf{t}) \\ \mathbf{K} &= \begin{bmatrix} f & 0 & 0 \\ 0 & f & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \end{aligned} \right\} \dots (1)$$

ここで、 λ_i は、第 i 画像平面内法線ベクトルの始点の射影的奥行きを表し、 λ'_i は、第 i 画像平面内法線ベクトルの終点の射影的奥行きを表す。 $\mathbf{K}$ は、内部パラメータ行列を表す。

[0044] 式 (1) を、第1画像平面内法線ベクトル、第2画像平面内法線ベクトル、第1世界座標空間内法線ベクトル、及び第2世界座標空間内法線ベクトルについて書き下すと、式 (2) のように表すことができる。

[数2]

$$\left. \begin{aligned}
 \lambda_1 \mathbf{m}_1 &= \mathbf{K} \mathbf{t} \\
 \lambda'_1 \mathbf{m}'_1 &= \mathbf{K} (z \mathbf{r}_3 + \mathbf{t}) \\
 \lambda_2 \mathbf{m}_2 &= \mathbf{K} (x_2 \mathbf{r}_1 + \mathbf{t}) \\
 \lambda'_2 \mathbf{m}'_2 &= \mathbf{K} (x_2 \mathbf{r}_1 + z \mathbf{r}_3 + \mathbf{t})
 \end{aligned} \right\} \dots (2)$$

ここで、 $\mathbf{r}_j$ は、回転行列 $\mathbf{R}$ における j 番目の列ベクトルを表している。

[0045] 式(2)における、1番目の式と2番目の式との差分をとり、3番目の式と4番目の式との差分をとると、式(3)が得られる。

[数3]

$$\left. \begin{aligned}
 \lambda'_1 \mathbf{m}'_1 - \lambda_1 \mathbf{m}_1 &= z \mathbf{K} \mathbf{r}_3 \\
 \lambda'_2 \mathbf{m}'_2 - \lambda_2 \mathbf{m}_2 &= z \mathbf{K} \mathbf{r}_3
 \end{aligned} \right\} \dots (3)$$

[0046] 式(3)は、1番目の式と2番目の式とが等しいことを示しているため、1番目の式と2番目の式との差分をとると、式(4)が得られる。

[数4]

$$\begin{aligned}
& \lambda'_1 \mathbf{m}'_1 - \lambda_1 \mathbf{m}_1 - (\lambda'_2 \mathbf{m}'_2 - \lambda_2 \mathbf{m}_2) \\
&= [-\mathbf{m}_1 \quad \mathbf{m}'_1 \quad \mathbf{m}_2 \quad -\mathbf{m}'_2] \begin{bmatrix} \lambda_1 \\ \lambda'_1 \\ \lambda_2 \\ \lambda'_2 \end{bmatrix} \\
&= A\lambda \\
&= 0 \quad \dots (4)
\end{aligned}$$

[0047] 式(4)は、射影的奥行きが、 3×4 の行列Aのゼロ空間であることを示している。換言すれば、射影的奥行きベクトル $[\lambda_1, \lambda'_1, \lambda_2, \lambda'_2]^T$ は、第1画像平面内始点ベクトル $\mathbf{m}_1$ 、第1画像平面内終点ベクトル $\mathbf{m}'_1$ 、第2画像平面内始点ベクトル $\mathbf{m}_2$ 、及び第2画像平面内終点ベクトル $\mathbf{m}'_2$ を行列要素とする行列Aのゼロ空間である。すなわち、スケール不定性を除いて各射影的奥行きの比率を求めることができる。符号の不定性も存在するが、式(1)に基づく射影的奥行きの符号は正のため、すべての λ の符号が正となるように選択すればよい。

[0048] 次に、算出された射影的奥行きを用いて焦点距離を算出する方法について説明する。

[0049] 式(2)の3番目の式及び4番目の式を式(4)に代入して整理し、また、式(2)の2番目の式及び4番目の式を式(4)に代入して整理すると、式(5)が得られる。

[数5]

$$\left. \begin{aligned} \mathbf{K}^{-1}(\lambda'_1 \mathbf{m}'_1 - \lambda_1 \mathbf{m}_1) &= z \mathbf{r}_3 \\ \mathbf{K}^{-1}(\lambda_2 \mathbf{m}_2 - \lambda_1 \mathbf{m}_1) &= x_2 \mathbf{r}_1 \end{aligned} \right\} \dots (5)$$

[0050] 回転行列の正規直交性 ($\mathbf{r}_1^T \mathbf{r}_3 = 0$) を利用すると、焦点距離 f について式 (6) が得られる。

[数6]

$$\begin{aligned} (\lambda'_1 \mathbf{m}'_1 - \lambda_1 \mathbf{m}_1)^T \mathbf{K}^{-T} \mathbf{K}^{-1} (\lambda_2 \mathbf{m}_2 - \lambda_1 \mathbf{m}_1) &= \\ (\lambda'_1 - \lambda_1)(\lambda_2 - \lambda_1) f^2 + (\lambda'_1 \mathbf{n}'_1 - \lambda_1 \mathbf{n}_1)^T (\lambda_2 \mathbf{n}_2 - \lambda_1 \mathbf{n}_1) &= 0 \quad \dots (6) \end{aligned}$$

式 (6) において、 $\mathbf{n}_i = [u_i, v_i]$ である。

[0051] 式 (6) は、 f についての2次式であるが、正符号の解を求めればよい。
 こうして、内部パラメータを算出することができる。

[0052] 次に、外部パラメータである回転行列 $\mathbf{R}$ 及び並進ベクトル $\mathbf{t}$ を算出する方法について説明する。

[0053] 回転行列 $\mathbf{R}$ の各列ベクトルの L_2 ノルムが1であることから、式 (5) から式 (7) を得ることができる。// //は、 L_2 ノルムを表す。

[数7]

$$\left. \begin{aligned} z &= \|\mathbf{K}^{-1}(\lambda'_1 \mathbf{m}'_1 - \lambda_1 \mathbf{m}_1)\| \\ \mathbf{r}_3 &= \frac{1}{z} \mathbf{K}^{-1}(\lambda'_1 \mathbf{m}'_1 - \lambda_1 \mathbf{m}_1) \\ x_2 &= \|\mathbf{K}^{-1}(\lambda_2 \mathbf{m}_2 - \lambda_1 \mathbf{m}_1)\| \\ \mathbf{r}_1 &= \frac{1}{x_2} \mathbf{K}^{-1}(\lambda_2 \mathbf{m}_2 - \lambda_1 \mathbf{m}_1) \end{aligned} \right\} \dots (7)$$

[0054] また、第1世界座標空間内法線ベクトル及び第2世界座標空間内法線ベクトルの高さ z 、及び、第2世界座標空間内法線ベクトルの x 軸座標 x_2 は、世界座標系の定義により、符号が正である。よって、回転行列 R は、式(8)によって表すことができる。

[数8]

$$R = \begin{bmatrix} \mathbf{r}_1 & \pm \mathbf{r}_3 \times \mathbf{r}_1 & \mathbf{r}_3 \end{bmatrix} \cdots (8)$$

[0055] 回転行列 R の2番目の列ベクトルには符号の不定正が存在するが、回転行列 R の行列式が $\det(R) = 1$ となる符号を選択すればよい。こうして、式(7)、(8)によって回転行列 R を算出することができる。

[0056] 並進ベクトル $\mathbf{t}$ は、式(2)の1番目の式を用いて、式(9)によって表すことができる。

[数9]

$$\mathbf{t} = \lambda_1 \mathbf{K}^{-1} \mathbf{m}_1 \cdots (9)$$

[0057] こうして、式(9)によって並進ベクトル $\mathbf{t}$ を算出することができる。

[0058] 以上のように第2実施形態によれば、カメラ校正装置40にて取得部41は、それぞれが世界座標空間における基準平面に対する法線ベクトルであり且つ互いに同じ長さを有する第1世界座標空間内法線ベクトル及び第2世界座標空間内法線ベクトルにそれぞれ対応する、第1画像平面内法線ベクトル及び第2画像平面内法線ベクトルを取得する。射影的奥行き算出部42は、第1画像平面内法線ベクトルの始点及び終点並びに第2画像平面内法線ベクトルの始点及び終点にそれぞれ対応する4つの射影的奥行きをベクトル要素とする射影的奥行きベクトルを算出する。

[0059] このカメラ校正装置40の構成により、射影的奥行きベクトルを算出することができるので、校正ボードを用いることなく、内部パラメータ及び外部パラメータを算出することができる。すなわち、より簡便な方法で内部パラメータ及び外部パラメータを算出することができる。また、3次元座標が未

知の条件下で画像情報のみを利用して単眼カメラの校正が可能である。その理由は、以下の通りである。まず、式（２）より、未知数の数は、１３個（ $\lambda_1, \lambda'_1, \lambda_2, \lambda'_2, x_2, z, f, t$, 回転行列 R の３軸回転角）である。しかし、射影的奥行きと３次元座標 x_2, z の間にはスケールの不定性が存在するため、実際の自由度は１２である。一方、１つの画像平面内法線ベクトルからは始点及び終点の座標として６個（ $m_i = [u_i, v_i, 1]^T$, $m'_i = [u'_i, v'_i, 1]^T$ ）の拘束条件が観測できるため、２つの画像平面内法線ベクトルでは１２個になる。このように、未知数の自由度と拘束条件の数が一致するため、問題を解くことが可能となる。

[0060] <変形例>

第２実施形態におけるカメラシステム１に対しては、次の様な変形を施すことができる。

[0061] <１>世界座標系及びカメラ座標系の設定は、上記の設定に限定されない。例えば、次のような設定であってもよい。すなわち、カメラ座標系の原点は、世界座標系の z 軸上に位置し、世界座標系の座標 $[0, 0, h]$ （ $=c$ ）を有している。また、カメラ座標系の z_c 軸は、カメラ２０の光軸に対応する。そして、世界座標系の $x-y$ 平面に対する z_c 軸の投影は、世界座標系の y 軸と重なる。すなわち、世界座標系の $+z$ 方向から見たときに、カメラ座標系の z_c 軸と世界座標系の y 軸とは重なるようになっている。このような設定にしても、未知数の数は変わらないため、２つ以上の法線ベクトルが取得できれば求めることができる。異なるスケールの３次元座標系は相似変換によって一致できるため、数学的には等価な問題である。

[0062] <２>基準平面は、水平面に限定されない。例えば、壁面を基準平面として、床面に平行な線分を世界座標空間内法線ベクトルと定義してもよい。

[0063] <３>画像平面内法線ベクトルが３つ以上取得できた場合には、公知である $RANSAC$ （Random Sample Consensus）や重み付き最小二乗法を利用して、尤もらしい、射影的奥行きベクトル、内部パラメータ、及び外部パラメータの解を算出してもよい。

[0064] <第3実施形態>

第3実施形態は、第1画像平面内法線ベクトル及び第2画像平面内法線ベクトルと、内部パラメータ及び外部パラメータとに基づいて、第1世界座標空間内法線ベクトル及び第2世界座標空間内法線ベクトルのそれぞれの始点及び終点の3次元座標を算出する。第3実施形態におけるカメラシステムの基本構成は、第2実施形態におけるカメラシステム1と同じなので、図2を参照して説明する。すなわち、第3実施形態におけるカメラシステム1は、カメラ校正装置40の代わりに、図5に示すカメラ校正装置50を含んでいる。

[0065] <カメラ校正装置の構成例>

図5は、第3実施形態におけるカメラ校正装置の一例を示すブロック図である。図5においてカメラ校正装置50は、3次元座標算出部51を有している。

[0066] 3次元座標算出部51は、取得部41にて取得された第1画像平面内法線ベクトル及び第2画像平面内法線ベクトルと、カメラパラメータ算出部43にて算出された内部パラメータ及び外部パラメータとに基づき、各画像平面内法線ベクトルの始点座標及び終点座標についての、世界座標系における2つの3次元座標を算出する。すなわち、3次元座標算出部51は、取得部41にて取得された第1画像平面内法線ベクトル及び第2画像平面内法線ベクトルと、カメラパラメータ算出部43にて算出された内部パラメータ及び外部パラメータとに基づき、第1世界座標空間内法線ベクトル及び第2世界座標空間内法線ベクトルのそれぞれの始点及び終点の3次元座標を算出する。

[0067] 式(1)を変形すると、式(10)又は式(11)が得られる。式(10)は、第1世界座標空間内法線ベクトルの長さ l_1 と第2世界座標空間内法線ベクトルの長さ l_2 とが同じ場合において、3次元座標を求める式である。一方、式(11)は、第1世界座標空間内法線ベクトルの長さ l_1 と第2世界座標空間内法線ベクトルの長さ l_2 とが異なる場合において、3次元座標を求める式である。なお、ここでの式(1)の変形は、式(1)の1番目の式の両辺のベク

トルが等しいことから、これらのクロス積がゼロとなることを利用している。
式（１）の２番目の式についても同様である。

[数10]

$$(\mathbf{K}^{-1}\mathbf{m}_i) \times (x_i\mathbf{r}_1 + y_i\mathbf{r}_2 + \mathbf{t}) = \mathbf{0}$$

$$(\mathbf{K}^{-1}\mathbf{m}'_i) \times (x_i\mathbf{r}_1 + y_i\mathbf{r}_2 + z_i\mathbf{r}_3 + \mathbf{t}) = \mathbf{0}$$

$$\Leftrightarrow \begin{bmatrix} (\mathbf{K}^{-1}\mathbf{m}_i) \times \mathbf{r}_1 & (\mathbf{K}^{-1}\mathbf{m}_i) \times \mathbf{r}_2 \\ (\mathbf{K}^{-1}\mathbf{m}'_i) \times \mathbf{r}_1 & (\mathbf{K}^{-1}\mathbf{m}'_i) \times \mathbf{r}_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_i \\ y_i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -(\mathbf{K}^{-1}\mathbf{m}_i) \times \mathbf{t} \\ -(\mathbf{K}^{-1}\mathbf{m}'_i) \times (z_i\mathbf{r}_3 + \mathbf{t}) \end{bmatrix}$$

・・・(10)

[数11]

$$(\mathbf{K}^{-1}\mathbf{m}_i) \times (x_i\mathbf{r}_1 + y_i\mathbf{r}_2 + \mathbf{t}) = \mathbf{0}$$

$$(\mathbf{K}^{-1}\mathbf{m}'_i) \times (x_i\mathbf{r}_1 + y_i\mathbf{r}_2 + z_i\mathbf{r}_3 + \mathbf{t}) = \mathbf{0}$$

$$\Leftrightarrow \begin{bmatrix} (\mathbf{K}^{-1}\mathbf{m}_i) \times \mathbf{r}_1 & (\mathbf{K}^{-1}\mathbf{m}_i) \times \mathbf{r}_2 & \mathbf{0} \\ (\mathbf{K}^{-1}\mathbf{m}'_i) \times \mathbf{r}_1 & (\mathbf{K}^{-1}\mathbf{m}'_i) \times \mathbf{r}_2 & (\mathbf{K}^{-1}\mathbf{m}'_i) \times \mathbf{r}_3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_i \\ y_i \\ z_i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -(\mathbf{K}^{-1}\mathbf{m}_i) \times \mathbf{t} \\ -(\mathbf{K}^{-1}\mathbf{m}'_i) \times \mathbf{t} \end{bmatrix}$$

・・・(11)

ただし、ベクトル $\mathbf{r}_1$, $\mathbf{r}_2$, $\mathbf{r}_3$ は、それぞれ、回転行列 $\mathbf{R}$ の列ベクトルを表し、 $[x_i, y_i]$ 及び $[x_i, y_i, z_i]$ は、算出対象の３次元座標を表す。
式（１０）の場合、 z_i は、 z である。

[0068] 式（１０）及び式（１１）は、線形連立方程式であるから、容易に解くことができる。

[0069] <カメラ校正装置の動作例>

図６は、第３実施形態におけるカメラ校正装置の処理動作の一例を示すフローチャートである。図６のフローチャートにおいてステップＳ１１からステップＳ１４は、図４のフローチャートと同じである。

[0070] ３次元座標算出部５１は、ステップＳ１１にて取得された第１画像平面内法線ベクトル及び第２画像平面内法線ベクトルと、ステップＳ１３，Ｓ１４にて算出された内部パラメータ及び外部パラメータとに基づき、第１世界座標空間内法線ベクトル及び第２世界座標空間内法線ベクトルのそれぞれの始

点及び終点の3次元座標を算出する（ステップS21）。

[0071] <変形例>

第3実施形態におけるカメラシステム1に対しては、次の様な変形を施すことができる。

[0072] <1>第1世界座標空間内法線ベクトル及び第2世界座標空間内法線ベクトルのそれぞれの始点及び終点の3次元座標を算出するための式は、式(10)、式(11)に限定されるものではない。例えば、式(10)、式(11)では消去されている射影的奥行きを含めて3次元座標が算出されてもよい。

[0073] <2>3次元座標算出部51は、複数の画像平面内法線ベクトルと内部パラメータ及び外部パラメータとに加えて、複数の画像平面内法線ベクトルのうちの少なくとも1つに対応する世界座標空間内法線ベクトルの長さ又はカメラ座標系の原点のz軸上の座標とに基づき、絶対的な3次元座標を算出してもよい。すなわち、取得した複数の画像平面内法線ベクトルの中で少なくとも1つに対応する世界座標空間内法線ベクトルについて、その絶対的な長さ（例えばメートル単位）が既知である場合、それを利用して、相対的な関係であるカメラ位置や世界座標空間内法線ベクトルの3次元座標を絶対的な関係へと変換できる。例えば、あるj番目の世界座標空間内法線ベクトルの終点のz座標が $z_j = a$ と既知である場合、その他の世界座標空間内法線ベクトルの3次元座標とカメラ位置 $c = -R^T t$ について a / z_j 倍すればよい。この処理は、3次元座標算出部51が $z_j = a$ を入力として受け付けて出力前に3次元座標算出部51によって実行されてもよいし、カメラ校正装置50の出力後に後処理として実行されてもよい。

[0074] <第4実施形態>

第4実施形態は、内部パラメータ、外部パラメータ、及び、3次元座標算出部にて算出された各画像平面内法線ベクトルについての2つの3次元座標の、最適化処理に関する、第4実施形態におけるカメラシステムの基本構成は、第2実施形態におけるカメラシステム1と同じなので、図2を参照して

説明する。すなわち、第4実施形態におけるカメラシステム1は、カメラ校正装置40の代わりに、図7に示すカメラ校正装置60を含んでいる。

[0075] <カメラ校正装置の構成例>

図7は、第4実施形態におけるカメラ校正装置の一例を示すブロック図である。図7においてカメラ校正装置60は、最適化部61を有している。

[0076] 最適化部61は、内部パラメータ、外部パラメータ、及び、3次元座標算出部51にて算出された各画像平面内法線ベクトルについての2つの3次元座標の、「最適化処理」を実行する。例えば、最適化部61は、第1世界座標空間内法線ベクトル及び第2世界座標空間内法線ベクトルのそれぞれの始点及び終点の3次元座標を、カメラパラメータ算出部43にて算出された内部パラメータ及び外部パラメータを用いて、画像平面に射影した2つの「再投影座標」を算出する。そして、最適化部61は、第1世界座標空間内法線ベクトル及び第2世界座標空間内法線ベクトルのそれぞれの2つの「再投影座標」と、第1画像平面内法線ベクトル及び第2画像平面内法線ベクトルのそれぞれの始点及び終点との誤差である「再投影誤差」を最少化することが期待される、調整後の内部パラメータ、調整後の外部パラメータ、及び調整後の上記2つの3次元座標を求める。これにより、カメラ20の内部パラメータ及び外部パラメータ並びに上記の3次元座標を最適化することができる。

[0077] 例えば、最適化部61は、式(12)に基づいて、3次元座標算出部51にて算出された3次元座標とカメラパラメータ算出部43によって算出された内部パラメータ及び外部パラメータとを初期値として用いて、非線形最適化を実行してもよい。最適化部61は、例えば、レーベンバーグ・マーカード法や信頼領域法などの公知な方法を用いて式(12)を解くことにより、各パラメータを最適化してもよい。ここで、最適化部61は、カメラ20の焦点距離、スキュー、光学中心、及びレンズ歪みの少なくとも1つを最適化対象の内部パラメータとしてもよい。

[数12]

$$\min_{\mathbf{R}, \mathbf{t}, f, x_i, y_i, z_i (i \in n)} \sum_{i=1}^n \|\mathbf{m}_i - \text{Proj}(\mathbf{K}(\mathbf{R}\mathbf{M}_i + \mathbf{t}))\|^2 + \|\mathbf{m}'_i - \text{Proj}(\mathbf{K}(\mathbf{R}\mathbf{M}'_i + \mathbf{t}))\|^2$$

・・・(12)

$$\text{s.t. } \mathbf{R}^T \mathbf{R} = \mathbf{I}, x_1 = 0, y_1 = 0, z_1 = 0, y_2 = 0, \frac{x_2}{z_2} = \text{constant}$$

ただし、Proj は、3次元ベクトルの第3成分によって、第1成分及び第2成分のそれぞれを除算して、斉次化座標系へ変換する関数を表す。

[0078] 斉次化するため、射影的奥行き用最適化は不要である。式(12)の3次元座標に関する拘束条件は、相対的な不定性を除去するためのものである。

[0079] ここで、式(4)、式(7)～(9)は、いわゆる代数的誤差を最小化する線形連立方程式に基づいている。また、射影的奥行き、焦点距離、回転行列、並進ベクトル、3次元座標と順番に計算していくため、後段になるほど誤差が蓄積する可能性がある。そこで、式(12)に表されるようないわゆる再投影誤差を最小化することで、パラメータ間の誤差を均質化し、統計的に最適なパラメータを計算することができる。

[0080] <カメラ校正装置の動作例>

図8は、第4実施形態におけるカメラ校正装置の処理動作の一例を示すフローチャートである。

[0081] 最適化部61は、ステップS13、S14にて算出された内部パラメータ及び外部パラメータと、ステップS21にて算出された各画像平面内法線ベクトルについての2つの3次元座標の、「最適化処理」を実行する(ステップS31)。

[0082] <変形例>

第4実施形態におけるカメラシステム1に対しては、次の様な変形を施すことができる。

[0083] <1>上記の式(12)の計算において、必ずしもすべてのパラメータを最適化する必要はない。例えば、第3実施形態の変形例<2>で述べたように、長さが既知の世界座標空間内法線ベクトルが存在する場合、その法線ベ

クトルの両端点の3次元座標は変数ではなく固定値としてよい。これにより、未知数の数が減少するため、より安定して式(12)の最適化を行うことができる。

[0084] <2>内部パラメータ算出部43Aではレンズ歪を求めていないが、式(12)においては最適化対象のパラメータにレンズ歪を含めてもよい。すなわち、レンズ歪に起因して画像平面内法線ベクトルが画像上で曲線になる場合であっても、レンズ歪の小さい画像中心部の画像平面内法線ベクトルを利用して又はレンズ歪みを微小と仮定してステップS21までの処理を行った後に、式(12)の計算においてレンズ歪を未知数として含めることによって、最終的な解を得ることができる。これにより、最適化部61は、レンズ歪を求めることができる。

[0085] <他の実施形態>

図9は、カメラ校正装置のハードウェア構成例を示す図である。図9においてカメラ校正装置100は、プロセッサ101と、メモリ102とを有している。プロセッサ101は、例えば、マイクロプロセッサ、MPU (Micro Processing Unit)、又はCPU (Central Processing Unit) であってもよい。プロセッサ101は、複数のプロセッサを含んでもよい。メモリ102は、揮発性メモリ及び不揮発性メモリの組み合わせによって構成される。メモリ102は、プロセッサ101から離れて配置されたストレージを含んでもよい。この場合、プロセッサ101は、図示されていないI/Oインタフェースを介してメモリ102にアクセスしてもよい。

[0086] 第1実施形態から第4実施形態のカメラ校正装置10、40、50、60は、それぞれ、図9に示したハードウェア構成を有することができる。第1実施形態から第4実施形態のカメラ校正装置10、40、50、60の取得部11、41と、射影的奥行き算出部12、42と、カメラパラメータ算出部13、43と、3次元座標算出部51と、最適化部61とは、プロセッサ101がメモリ102に記憶されたプログラムを読み込んで実行することにより実現されてもよい。プログラムは、様々なタイプの非一時的なコンピュ

ータ可読媒体 (non-transitory computer readable medium) を用いて格納され、カメラ校正装置 10, 40, 50, 60 に供給することができる。非一時的なコンピュータ可読媒体の例は、磁気記録媒体 (例えばフレキシブルディスク、磁気テープ、ハードディスクドライブ)、光磁気記録媒体 (例えば光磁気ディスク) を含む。さらに、非一時的なコンピュータ可読媒体の例は、CD-ROM (Read Only Memory)、CD-R、CD-R/W を含む。さらに、非一時的なコンピュータ可読媒体の例は、半導体メモリを含む。半導体メモリは、例えば、マスク ROM、PROM (Programmable ROM)、EPROM (Erasable PROM)、フラッシュ ROM、RAM (Random Access Memory) を含む。また、プログラムは、様々なタイプの一時的なコンピュータ可読媒体 (transitory computer readable medium) によってカメラ校正装置 10, 40, 50, 60 に供給されてもよい。一時的なコンピュータ可読媒体の例は、電気信号、光信号、及び電磁波を含む。一時的なコンピュータ可読媒体は、電線及び光ファイバ等の有線通信路、又は無線通信路を介して、プログラムをカメラ校正装置 10, 40, 50, 60 に供給できる。

[0087] 以上、実施の形態を参照して本願発明を説明したが、本願発明は上記によって限定されるものではない。本願発明の構成や詳細には、発明のScope内で当業者が理解し得る様々な変更をすることができる。

[0088] 上記の実施形態の一部又は全部は、以下の付記のようにも記載されうるが、以下には限られない。

[0089] (付記 1)

カメラによって世界座標空間が撮影された画像の画像平面において、それぞれが前記世界座標空間における基準平面に対する法線ベクトルであり且つ互いに同じ長さを有する第 1 世界座標空間内法線ベクトル及び第 2 世界座標空間内法線ベクトルにそれぞれ対応する、第 1 画像平面内法線ベクトル及び第 2 画像平面内法線ベクトルを取得する取得部と、

前記第 1 画像平面内法線ベクトルの第 1 始点及び第 1 終点並びに前記第 2 画像平面内法線ベクトルの第 2 始点及び第 2 終点にそれぞれ対応する 4 つの

射影的奥行きをベクトル要素とする射影的奥行きベクトルを算出する、射影的奥行き算出部と、

前記算出された射影的奥行きベクトルと、前記第 1 始点及び第 1 終点にそれぞれ対応する第 1 画像平面内始点ベクトル及び第 1 画像平面内終点ベクトル並びに前記第 2 始点及び前記第 2 終点にそれぞれ対応する第 2 画像平面内始点ベクトル及び第 2 画像平面内終点ベクトルとに基づいて、前記カメラの内部パラメータ及び外部パラメータを算出する、カメラパラメータ算出部と、

を具備するカメラ校正装置。

[0090] (付記 2)

前記射影的奥行き算出部は、前記射影的奥行きベクトルが、前記第 1 画像平面内始点ベクトル、前記第 1 画像平面内終点ベクトル、前記第 2 画像平面内始点ベクトル、及び前記第 2 画像平面内終点ベクトルを行列要素とする第 1 行列のゼロ空間である、関係に基づいて、前記射影的奥行きベクトルを算出する、

付記 1 記載のカメラ校正装置。

[0091] (付記 3)

前記外部パラメータは、回転行列及び並進ベクトルを含み、

前記カメラパラメータ算出部は、前記算出された射影的奥行きベクトルと、前記第 1 画像平面内始点ベクトル、前記第 1 画像平面内終点ベクトル、前記第 2 画像平面内始点ベクトル、及び前記第 2 画像平面内終点ベクトルと、前記回転行列の各 2 つの列ベクトルの間の直交関係とに基づいて、前記内部パラメータとしての前記カメラの焦点距離を算出する内部パラメータ算出部を含む、

付記 1 又は 2 記載のカメラ校正装置。

[0092] (付記 4)

前記カメラパラメータ算出部は、前記算出された射影的奥行きベクトルと、前記第 1 画像平面内始点ベクトル、前記第 1 画像平面内終点ベクトル、前

記第 2 画像平面内始点ベクトル、及び前記第 2 画像平面内終点ベクトルと、前記算出された焦点距離とに基づいて、前記回転行列及び前記並進ベクトルを算出する外部パラメータ算出部をさらに含む、

付記 3 記載のカメラ校正装置。

[0093] (付記 5)

世界座標系は、前記第 1 世界座標空間内法線ベクトルの始点が前記世界座標系の原点と一致し、前記第 2 世界座標空間内法線ベクトルの始点が前記世界座標系の第 1 軸上に存在し、前記第 1 世界座標空間内法線ベクトルの終点が前記世界座標系の第 3 軸上に存在するように、定義されている、

付記 4 記載のカメラ校正装置。

[0094] (付記 6)

前記内部パラメータ算出部は、式 (A 1) を用いて、前記カメラの焦点距離を算出する、

付記 5 記載のカメラ校正装置。

[数13]

$$(\lambda'_1 - \lambda_1)(\lambda_2 - \lambda_1)f^2 + (\lambda'_1 \mathbf{n}'_1 - \lambda_1 \mathbf{n}_1)^T (\lambda_2 \mathbf{n}_2 - \lambda_1 \mathbf{n}_1) = 0 \quad \dots (A 1)$$

ただし、 λ_1 、 λ'_1 、 λ_2 、及び λ'_2 は、それぞれ、前記第 1 始点、前記第 1 終点、前記第 2 始点、及び前記第 2 終点の射影的奥行きを表し、 f は、前記焦点距離を表し、ベクトル $\mathbf{n}_1$ 、 $\mathbf{n}'_1$ 、 $\mathbf{n}_2$ 、 $\mathbf{n}'_2$ は、それぞれ、前記第 1 画像平面内始点ベクトル、前記第 1 画像平面内終点ベクトル、前記第 2 画像平面内始点ベクトル、及び前記第 2 画像平面内終点ベクトルを表す。

[0095] (付記 7)

前記外部パラメータ算出部は、式 (A 2)、式 (A 3)、及び式 (A 4) を用いて、前記回転行列を算出し、式 (A 4) 及び式 (A 5) を用いて、前記並進ベクトルを算出する、

付記 6 記載のカメラ校正装置。

[数14]

$$\mathbf{R} = [\mathbf{r}_1 \quad \pm \mathbf{r}_3 \times \mathbf{r}_1 \quad \mathbf{r}_3] \quad \dots (A 2)$$

[数15]

$$\left. \begin{aligned} z &= \| \mathbf{K}^{-1}(\lambda'_1 \mathbf{m}'_1 - \lambda_1 \mathbf{m}_1) \| \\ \mathbf{r}_3 &= \frac{1}{z} \mathbf{K}^{-1}(\lambda'_1 \mathbf{m}'_1 - \lambda_1 \mathbf{m}_1) \\ x_2 &= \| \mathbf{K}^{-1}(\lambda_2 \mathbf{m}_2 - \lambda_1 \mathbf{m}_1) \| \\ \mathbf{r}_1 &= \frac{1}{x_2} \mathbf{K}^{-1}(\lambda_2 \mathbf{m}_2 - \lambda_1 \mathbf{m}_1) \end{aligned} \right\} \dots (A3)$$

[数16]

$$\mathbf{K} = \begin{bmatrix} f & 0 & 0 \\ 0 & f & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \dots (A4)$$

[数17]

$$\mathbf{t} = \lambda_1 \mathbf{K}^{-1} \mathbf{m}_1 \dots (A5)$$

ただし、 $\mathbf{R}$ は、前記回転行列を表し、ベクトル $\mathbf{r}_1$ 、 $\mathbf{r}_3$ は、前記回転行列の1列目及び3列目の列ベクトルを表し、 z は、前記第1世界座標空間内法線ベクトルの終点及び前記第2世界座標空間内法線ベクトルの終点の前記第3軸の座標を表し、 x_2 は、前記第2世界座標空間内法線ベクトルの始点の前記第1軸上の座標を表し、 λ_1 、 λ'_1 、 λ_2 、及び λ'_2 は、それぞれ、前記第1始点、前記第1終点、前記第2始点、及び前記第2終点の射影的奥行きを表し、ベクトル $\mathbf{m}_1$ 、 $\mathbf{m}'_1$ 、 $\mathbf{m}_2$ 、 $\mathbf{m}'_2$ は、それぞれ、前記第1画像平面内始点ベクトル、前記第1画像平面内終点ベクトル、前記第2画像平面内始点ベクトル、及び前記第2画像平面内終点ベクトルを表す。// //は、L2

ノルムを表す。t は、前記並進ベクトルを表す。K は、内部パラメータ行列を表し、f は、前記焦点距離を表す。

[0096] (付記 8)

前記取得部にて取得された第 1 画像平面内法線ベクトル及び第 2 画像平面内法線ベクトルと、前記カメラパラメータ算出部によって算出された内部パラメータ及び外部パラメータとに基づいて、前記第 1 世界座標空間内法線ベクトル及び前記第 2 世界座標空間内法線ベクトルのそれぞれの始点及び終点の 3 次元座標を算出する 3 次元座標算出部をさらに具備する、

付記 5 から 7 のいずれか 1 項に記載のカメラ校正装置。

[0097] (付記 9)

前記 3 次元座標算出部は、式 (A 6) を用いて、前記 3 次元座標を算出する、

付記 8 記載のカメラ校正装置。

[数 18]

$$\begin{bmatrix} (\mathbf{K}^{-1}\mathbf{m}_i) \times \mathbf{r}_1 & (\mathbf{K}^{-1}\mathbf{m}_i) \times \mathbf{r}_2 \\ (\mathbf{K}^{-1}\mathbf{m}'_i) \times \mathbf{r}_1 & (\mathbf{K}^{-1}\mathbf{m}'_i) \times \mathbf{r}_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_i \\ y_i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -(\mathbf{K}^{-1}\mathbf{m}_i) \times \mathbf{t} \\ -(\mathbf{K}^{-1}\mathbf{m}'_i) \times (z\mathbf{r}_3 + \mathbf{t}) \end{bmatrix}$$

・・・ (A 6)

ただし、ベクトル $\mathbf{r}_1$, $\mathbf{r}_2$, $\mathbf{r}_3$ は、それぞれ、前記回転行列の列ベクトルを表し、ベクトル $\mathbf{m}_i$, $\mathbf{m}'_i$ は、第 i 画像平面内始点ベクトル及び第 i 画像平面内終点ベクトルを表し、 x_i , y_i は、第 i 世界座標空間内法線ベクトルの始点及び終点の前記世界座標系の第 1 軸及び第 2 軸の座標を表し、 z は、前記第 1 世界座標空間内法線ベクトルの終点及び前記第 2 世界座標空間内法線ベクトルの終点の前記第 3 軸の座標を表す。t は、前記並進ベクトルを表す。K は、式 (A 7) で表される内部パラメータ行列を表し、f は、前記焦点距離を表す。

[数19]

$$\mathbf{K} = \begin{bmatrix} f & 0 & 0 \\ 0 & f & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \cdot \cdot (A7)$$

[0098] (付記10)

前記算出された、前記第1世界座標空間内法線ベクトル及び前記第2世界座標空間内法線ベクトルのそれぞれの始点及び終点の3次元座標を前記カメラパラメータ算出部によって算出された内部パラメータ及び外部パラメータを用いて前記画像平面に射影した2つの再投影座標と、前記第1画像平面内法線ベクトル及び前記第2画像平面内法線ベクトルのそれぞれの始点及び終点との誤差である再投影誤差を最少化することが期待される、調整後の内部パラメータ、調整後の外部パラメータ、及び調整後の前記3次元座標を求めることにより、前記カメラの内部パラメータ及び外部パラメータ並びに前記3次元座標を最適化する、最適化部を具備する、

付記8又は9に記載のカメラ校正装置。

[0099] (付記11)

前記最適化部は、式(A8)に基づいて、前記3次元座標算出部にて算出された3次元座標と前記カメラパラメータ算出部によって算出された内部パラメータ及び外部パラメータとを初期値として用いて、非線形最適化を行うことにより、前記カメラの内部パラメータ及び外部パラメータ並びに前記3次元座標を最適化する、

付記10に記載のカメラ校正装置。

[数20]

$$\min_{\mathbf{R}, \mathbf{t}, f, x_i, y_i, z_i (i \in n)} \sum_{i=1}^n \|\mathbf{m}_i - Proj(\mathbf{K}(\mathbf{R}\mathbf{M}_i + \mathbf{t}))\|^2 + \|\mathbf{m}'_i - Proj(\mathbf{K}(\mathbf{R}\mathbf{M}'_i + \mathbf{t}))\|^2$$

... (A8)

$$\text{s.t. } \mathbf{R}^T \mathbf{R} = \mathbf{I}, x_1 = 0, y_1 = 0, z_1 = 0, y_2 = 0, \frac{x_2}{z_2} = constant$$

ただし、 Proj は、3次元ベクトルの第3成分によって、第1成分及び第2成分のそれぞれを除算して、斉次化座標系へ変換する関数を表し、 R は、前記回転行列を表し、 t は、前記並進ベクトルを表し、ベクトル m_i 、 m_i' は、第 i 画像平面内始点ベクトル及び第 i 画像平面内終点ベクトルを表し、 M_i 、 M_i' は、第 i 世界座標空間内法線ベクトルの始点ベクトル及び終点ベクトルを表し、 x_i 、 y_i 、 z_i は、第 i 世界座標空間内法線ベクトルの始点及び終点についての2つの3次元座標を表し、 $//$ $//$ は、ノルムを表す。 K は、式 (A 9) で表される内部パラメータ行列を表し、 f は、前記焦点距離を表す。 T は、ベクトル又は行列の転置を表す。

[数21]

$$\mathbf{K} = \begin{bmatrix} f & 0 & 0 \\ 0 & f & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdots \cdots (\text{A } 9)$$

[0100] (付記 1 2)

前記最適化部は、前記カメラの焦点距離、スキュー、光学中心、及びレンズ歪みの少なくとも1つを最適化対象の内部パラメータとする、

付記 1 0 又は 1 1 に記載のカメラ校正装置。

[0101] (付記 1 3)

付記 1 から 1 2 のいずれか 1 項に記載のカメラ校正装置と、

前記カメラによって世界座標空間が撮影された画像を前記カメラ校正装置へ供給する画像供給装置と、

を具備する、カメラシステム。

[0102] (付記 1 4)

カメラによって世界座標空間が撮影された画像の画像平面において、それぞれが前記世界座標空間における基準平面に対する法線ベクトルであり且つ互いに同じ長さを有する第1世界座標空間内法線ベクトル及び第2世界座標空間内法線ベクトルにそれぞれ対応する、第1画像平面内法線ベクトル及び

第2画像平面内法線ベクトルを取得し、

前記第1画像平面内法線ベクトルの第1始点及び第1終点並びに前記第2画像平面内法線ベクトルの第2始点及び第2終点にそれぞれ対応する4つの射影的奥行きをベクトル要素とする射影的奥行きベクトルを算出し、

前記算出された射影的奥行きベクトルと、前記第1始点及び第1終点にそれぞれ対応する第1画像平面内始点ベクトル及び第1画像平面内終点ベクトル並びに前記第2始点及び前記第2終点にそれぞれ対応する第2画像平面内始点ベクトル及び第2画像平面内終点ベクトルとに基づいて、前記カメラの内部パラメータ及び外部パラメータを算出する、

カメラ校正方法。

[0103] (付記15)

カメラによって世界座標空間が撮影された画像の画像平面において、それぞれが前記世界座標空間における基準平面に対する法線ベクトルであり且つ互いに同じ長さを有する第1世界座標空間内法線ベクトル及び第2世界座標空間内法線ベクトルにそれぞれ対応する、第1画像平面内法線ベクトル及び第2画像平面内法線ベクトルを取得し、

前記第1画像平面内法線ベクトルの第1始点及び第1終点並びに前記第2画像平面内法線ベクトルの第2始点及び第2終点にそれぞれ対応する4つの射影的奥行きをベクトル要素とする射影的奥行きベクトルを算出し、

前記算出された射影的奥行きベクトルと、前記第1始点及び第1終点にそれぞれ対応する第1画像平面内始点ベクトル及び第1画像平面内終点ベクトル並びに前記第2始点及び前記第2終点にそれぞれ対応する第2画像平面内始点ベクトル及び第2画像平面内終点ベクトルとに基づいて、前記カメラの内部パラメータ及び外部パラメータを算出する、

処理を、カメラ校正装置に実行させるプログラムが格納された非一時的なコンピュータ可読媒体。

符号の説明

[0104] 1 カメラシステム

- 1 0 カメラ校正装置
- 1 1 取得部
- 1 2 射影的奥行き算出部
- 1 3 カメラパラメータ算出部
- 2 0 カメラ
- 3 0 画像供給装置
- 4 0 カメラ校正装置
- 4 1 取得部
- 4 2 射影的奥行き算出部
- 4 3 カメラパラメータ算出部
- 4 3 A 内部パラメータ算出部
- 4 3 B 外部パラメータ算出部
- 5 0 カメラ校正装置
- 5 1 3次元座標算出部
- 6 0 カメラ校正装置
- 6 1 最適化部

請求の範囲

[請求項1] カメラによって世界座標空間が撮影された画像の画像平面において、それぞれが前記世界座標空間における基準平面に対する法線ベクトルであり且つ互いに同じ長さを有する第1世界座標空間内法線ベクトル及び第2世界座標空間内法線ベクトルにそれぞれ対応する、第1画像平面内法線ベクトル及び第2画像平面内法線ベクトルを取得する取得部と、

前記第1画像平面内法線ベクトルの第1始点及び第1終点並びに前記第2画像平面内法線ベクトルの第2始点及び第2終点にそれぞれ対応する4つの射影的奥行きをベクトル要素とする射影的奥行きベクトルを算出する、射影的奥行き算出部と、

前記算出された射影的奥行きベクトルと、前記第1始点及び第1終点にそれぞれ対応する第1画像平面内始点ベクトル及び第1画像平面内終点ベクトル並びに前記第2始点及び前記第2終点にそれぞれ対応する第2画像平面内始点ベクトル及び第2画像平面内終点ベクトルとに基づいて、前記カメラの内部パラメータ及び外部パラメータを算出する、カメラパラメータ算出部と、

を具備するカメラ校正装置。

[請求項2] 前記射影的奥行き算出部は、前記射影的奥行きベクトルが、前記第1画像平面内始点ベクトル、前記第1画像平面内終点ベクトル、前記第2画像平面内始点ベクトル、及び前記第2画像平面内終点ベクトルを行列要素とする第1行列のゼロ空間である、関係に基づいて、前記射影的奥行きベクトルを算出する、

請求項1記載のカメラ校正装置。

[請求項3] 前記外部パラメータは、回転行列及び並進ベクトルを含み、

前記カメラパラメータ算出部は、前記算出された射影的奥行きベクトルと、前記第1画像平面内始点ベクトル、前記第1画像平面内終点ベクトル、前記第2画像平面内始点ベクトル、及び前記第2画像平面

内終点ベクトルと、前記回転行列の各2つの列ベクトルの間の直交関係とに基づいて、前記内部パラメータとしての前記カメラの焦点距離を算出する内部パラメータ算出部を含む、

請求項1又は2記載のカメラ校正装置。

[請求項4] 前記カメラパラメータ算出部は、前記算出された射影的奥行きベクトルと、前記第1画像平面内始点ベクトル、前記第1画像平面内終点ベクトル、前記第2画像平面内始点ベクトル、及び前記第2画像平面内終点ベクトルと、前記算出された焦点距離とに基づいて、前記回転行列及び前記並進ベクトルを算出する外部パラメータ算出部をさらに含む、

請求項3記載のカメラ校正装置。

[請求項5] 世界座標系は、前記第1世界座標空間内法線ベクトルの始点が前記世界座標系の原点と一致し、前記第2世界座標空間内法線ベクトルの始点が前記世界座標系の第1軸上に存在し、前記第1世界座標空間内法線ベクトルの終点が前記世界座標系の第3軸上に存在するように、定義されている、

請求項4記載のカメラ校正装置。

[請求項6] 前記内部パラメータ算出部は、式(1)を用いて、前記カメラの焦点距離を算出する、

請求項5記載のカメラ校正装置。

[数1]

$$(\lambda'_1 - \lambda_1)(\lambda_2 - \lambda_1)f^2 + (\lambda'_1 \mathbf{n}'_1 - \lambda_1 \mathbf{n}_1)^T (\lambda_2 \mathbf{n}_2 - \lambda_1 \mathbf{n}_1) = 0 \quad \dots (1)$$

ただし、 λ_1 、 λ'_1 、 λ_2 、及び λ'_2 は、それぞれ、前記第1始点、前記第1終点、前記第2始点、及び前記第2終点の射影的奥行きを表し、 f は、前記焦点距離を表し、ベクトル $\mathbf{n}_1$ 、 $\mathbf{n}'_1$ 、 $\mathbf{n}_2$ 、 $\mathbf{n}'_2$ は、それぞれ、前記第1画像平面内始点ベクトル、前記第1画像平面内終点ベクトル、前記第2画像平面内始点ベクトル、及び前記第2画像平面内終点ベクトルを表す。

[請求項7] 前記外部パラメータ算出部は、式（２）、式（３）、及び式（４）を用いて、前記回転行列を算出し、式（４）及び式（５）を用いて、前記並進ベクトルを算出する、

請求項６記載のカメラ校正装置。

[数2]

$$\mathbf{R} = [\mathbf{r}_1 \quad \pm \mathbf{r}_3 \times \mathbf{r}_1 \quad \mathbf{r}_3] \quad \dots (2)$$

[数3]

$$\left. \begin{aligned} z &= \|\mathbf{K}^{-1}(\lambda'_1 \mathbf{m}'_1 - \lambda_1 \mathbf{m}_1)\| \\ \mathbf{r}_3 &= \frac{1}{z} \mathbf{K}^{-1}(\lambda'_1 \mathbf{m}'_1 - \lambda_1 \mathbf{m}_1) \\ x_2 &= \|\mathbf{K}^{-1}(\lambda_2 \mathbf{m}_2 - \lambda_1 \mathbf{m}_1)\| \\ \mathbf{r}_1 &= \frac{1}{x_2} \mathbf{K}^{-1}(\lambda_2 \mathbf{m}_2 - \lambda_1 \mathbf{m}_1) \end{aligned} \right\} \dots (3)$$

[数4]

$$\mathbf{K} = \begin{bmatrix} f & 0 & 0 \\ 0 & f & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad \dots (4)$$

[数5]

$$\mathbf{t} = \lambda_1 \mathbf{K}^{-1} \mathbf{m}_1 \quad \dots (5)$$

ただし、 $\mathbf{R}$ は、前記回転行列を表し、ベクトル $\mathbf{r}_1$ 、 $\mathbf{r}_3$ は、前記回転行列の１列目及び３列目の列ベクトルを表し、 z は、前記第１世界座標空間内法線ベクトルの終点及び前記第２世界座標空間内法線ベクトルの終点の前記第３軸の座標を表し、 x_2 は、前記第２世界座標空間内法線ベクトルの始点の前記第１軸上の座標を表し、 λ_1 、 λ'_1 、 λ_2 、及び λ'_2 は、それぞれ、前記第１始点、前記第１終点、前

記第2始点、及び前記第2終点の射影的奥行きを表し、ベクトル m_1 , m'_1 , m_2 , m'_2 は、それぞれ、前記第1画像平面内始点ベクトル、前記第1画像平面内終点ベクトル、前記第2画像平面内始点ベクトル、及び前記第2画像平面内終点ベクトルを表す。// //は、 L_2 ノルムを表す。 t は、前記並進ベクトルを表す。 K は、内部パラメータ行列を表し、 f は、前記焦点距離を表す。

[請求項8]

前記取得部にて取得された第1画像平面内法線ベクトル及び第2画像平面内法線ベクトルと、前記カメラパラメータ算出部によって算出された内部パラメータ及び外部パラメータとに基づいて、前記第1世界座標空間内法線ベクトル及び前記第2世界座標空間内法線ベクトルのそれぞれの始点及び終点の3次元座標を算出する3次元座標算出部をさらに具備する、

請求項5から7のいずれか1項に記載のカメラ校正装置。

[請求項9]

前記3次元座標算出部は、式(6)を用いて、前記3次元座標を算出する、

請求項8記載のカメラ校正装置。

[数6]

$$\begin{bmatrix} (K^{-1}m_i) \times r_1 & (K^{-1}m_i) \times r_2 \\ (K^{-1}m'_i) \times r_1 & (K^{-1}m'_i) \times r_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_i \\ y_i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -(K^{-1}m_i) \times t \\ -(K^{-1}m'_i) \times (zr_3 + t) \end{bmatrix} \quad \dots (6)$$

ただし、ベクトル r_1 , r_2 , r_3 は、それぞれ、前記回転行列の列ベクトルを表し、ベクトル m_i , m'_i は、第 i 画像平面内始点ベクトル及び第 i 画像平面内終点ベクトルを表し、 x_i , y_i は、第 i 世界座標空間内法線ベクトルの始点及び終点の前記世界座標系の第1軸及び第2軸の座標を表し、 z は、前記第1世界座標空間内法線ベクトルの終点及び前記第2世界座標空間内法線ベクトルの終点の前記第3軸の座標を表す。 t は、前記並進ベクトルを表す。 K は、式(7)で表される内部パラメータ行列を表し、 f は、前記焦点距離を表す。

[数7]

$$\mathbf{K} = \begin{bmatrix} f & 0 & 0 \\ 0 & f & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdots (7)$$

[請求項10]

前記算出された、前記第1世界座標空間内法線ベクトル及び前記第2世界座標空間内法線ベクトルのそれぞれの始点及び終点の3次元座標を前記カメラパラメータ算出部によって算出された内部パラメータ及び外部パラメータを用いて前記画像平面に射影した2つの再投影座標と、前記第1画像平面内法線ベクトル及び前記第2画像平面内法線ベクトルのそれぞれの始点及び終点との誤差である再投影誤差を最小化することが期待される、調整後の内部パラメータ、調整後の外部パラメータ、及び調整後の前記3次元座標を求めることにより、前記カメラの内部パラメータ及び外部パラメータ並びに前記3次元座標を最適化する、最適化部を具備する、

請求項8又は9に記載のカメラ校正装置。

[請求項11]

前記最適化部は、式(8)に基づいて、前記3次元座標算出部にて算出された3次元座標と前記カメラパラメータ算出部によって算出された内部パラメータ及び外部パラメータとを初期値として用いて、非線形最適化を行うことにより、前記カメラの内部パラメータ及び外部パラメータ並びに前記3次元座標を最適化する、

請求項10に記載のカメラ校正装置。

[数8]

$$\min_{\mathbf{R}, \mathbf{t}, f, x_i, y_i, z_i} \sum_{i=1}^n \|\mathbf{m}_i - \text{Proj}(\mathbf{K}(\mathbf{R}\mathbf{M}_i + \mathbf{t}))\|^2 + \|\mathbf{m}'_i - \text{Proj}(\mathbf{K}(\mathbf{R}\mathbf{M}'_i + \mathbf{t}))\|^2 \cdots (8)$$

$$\text{s.t. } \mathbf{R}^T \mathbf{R} = \mathbf{I}, x_1 = 0, y_1 = 0, z_1 = 0, y_2 = 0, \frac{x_2}{z_2} = \text{constant}$$

ただし、Projは、3次元ベクトルの第3成分によって、第1成

分及び第2成分のそれぞれを除算して、斉次化座標系へ変換する関数
を表し、 R は、前記回転行列を表し、 t は、前記並進ベクトルを表し、
ベクトル m_i 、 m'_i は、第 i 画像平面内始点ベクトル及び第 i 画
像平面内終点ベクトルを表し、 M_i 、 M'_i は、第 i 世界座標空間内
法線ベクトルの始点ベクトル及び終点ベクトルを表し、 x_i 、 y_i 、
 z_i は、第 i 世界座標空間内法線ベクトルの始点及び終点についての
2つの3次元座標を表し、 $//$ $//$ は、ノルムを表す。 K は、式(9)
で表される内部パラメータ行列を表し、 f は、前記焦点距離を表す。
 T は、ベクトル又は行列の転置を表す。

[数9]

$$K = \begin{bmatrix} f & 0 & 0 \\ 0 & f & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdots (9)$$

[請求項12] 前記最適化部は、前記カメラの焦点距離、スキュー、光学中心、及
びレンズ歪みの少なくとも1つを最適化対象の内部パラメータとする
、

請求項10又は11に記載のカメラ校正装置。

[請求項13] 請求項1から12のいずれか1項に記載のカメラ校正装置と、
前記カメラによって世界座標空間が撮影された画像を前記カメラ校
正装置へ供給する画像供給装置と、
を具備する、カメラシステム。

[請求項14] カメラによって世界座標空間が撮影された画像の画像平面において
、それぞれが前記世界座標空間における基準平面に対する法線ベクト
ルであり且つ互いに同じ長さを有する第1世界座標空間内法線ベクト
ル及び第2世界座標空間内法線ベクトルにそれぞれ対応する、第1画
像平面内法線ベクトル及び第2画像平面内法線ベクトルを取得し、

前記第1画像平面内法線ベクトルの第1始点及び第1終点並びに前
記第2画像平面内法線ベクトルの第2始点及び第2終点にそれぞれ対

応する4つの射影的奥行きをベクトル要素とする射影的奥行きベクトルを算出し、

前記算出された射影的奥行きベクトルと、前記第1始点及び第1終点にそれぞれ対応する第1画像平面内始点ベクトル及び第1画像平面内終点ベクトル並びに前記第2始点及び前記第2終点にそれぞれ対応する第2画像平面内始点ベクトル及び第2画像平面内終点ベクトルとに基づいて、前記カメラの内部パラメータ及び外部パラメータを算出する、

カメラ校正方法。

[請求項15]

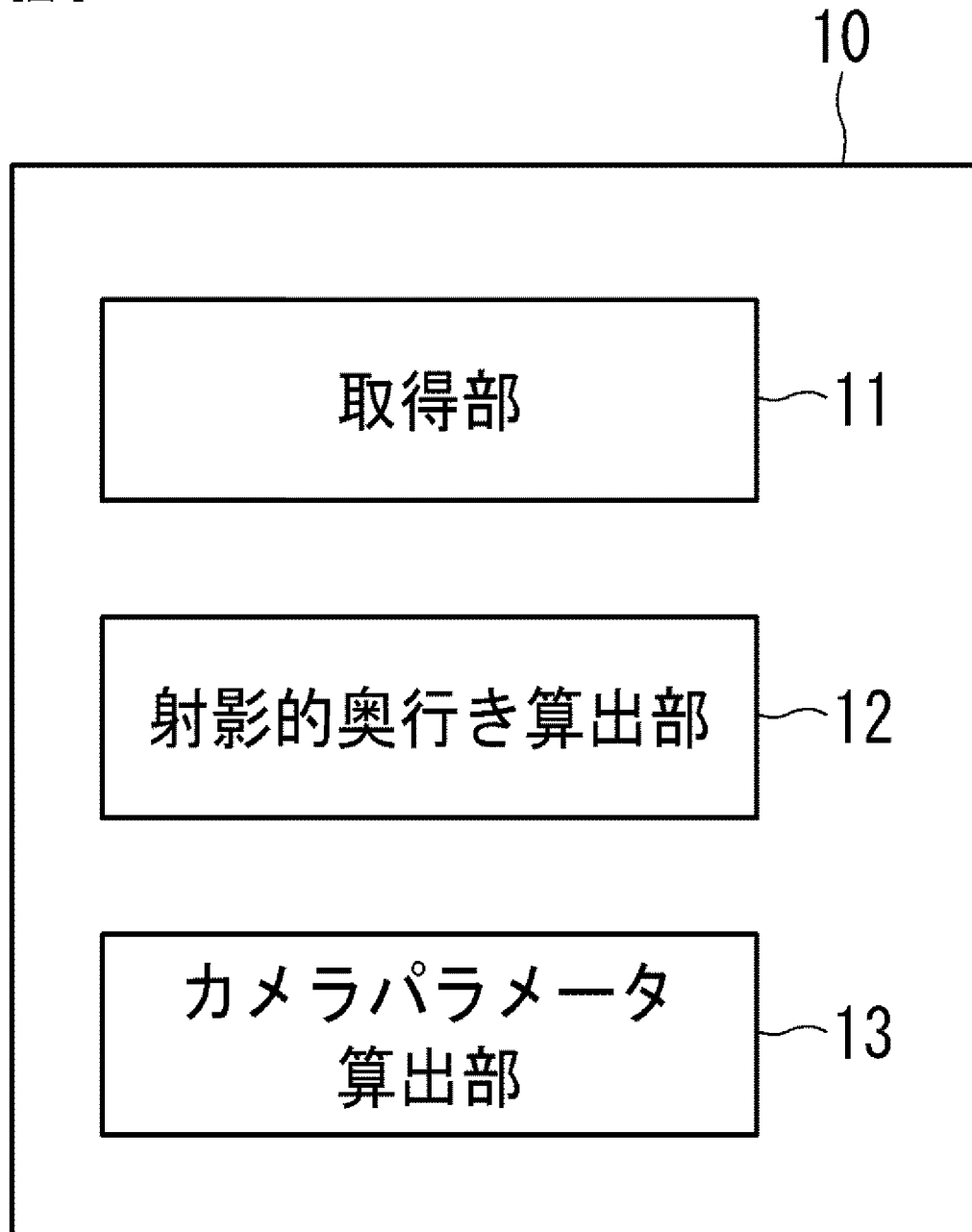
カメラによって世界座標空間が撮影された画像の画像平面において、それぞれが前記世界座標空間における基準平面に対する法線ベクトルであり且つ互いに同じ長さを有する第1世界座標空間内法線ベクトル及び第2世界座標空間内法線ベクトルにそれぞれ対応する、第1画像平面内法線ベクトル及び第2画像平面内法線ベクトルを取得し、

前記第1画像平面内法線ベクトルの第1始点及び第1終点並びに前記第2画像平面内法線ベクトルの第2始点及び第2終点にそれぞれ対応する4つの射影的奥行きをベクトル要素とする射影的奥行きベクトルを算出し、

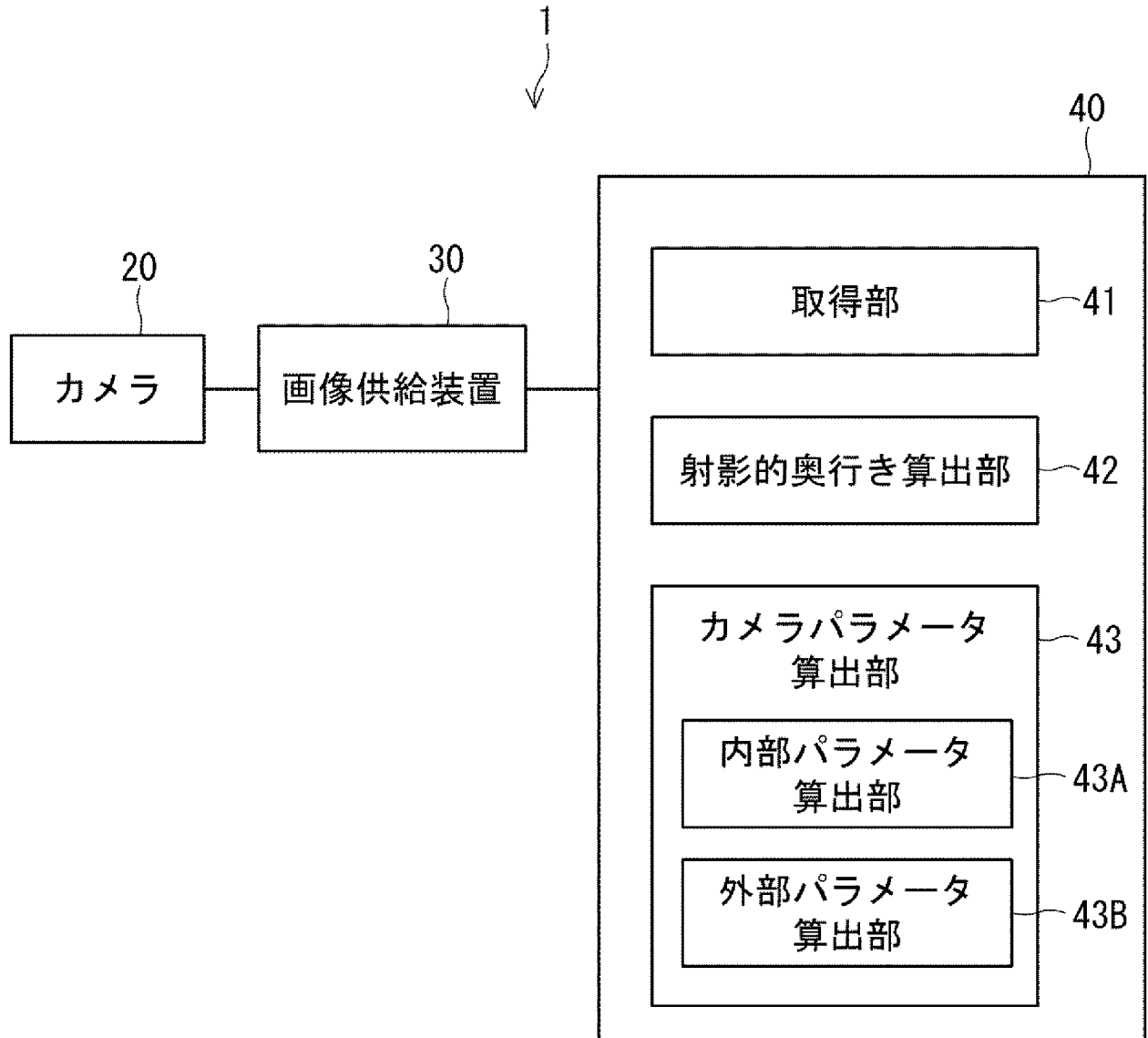
前記算出された射影的奥行きベクトルと、前記第1始点及び第1終点にそれぞれ対応する第1画像平面内始点ベクトル及び第1画像平面内終点ベクトル並びに前記第2始点及び前記第2終点にそれぞれ対応する第2画像平面内始点ベクトル及び第2画像平面内終点ベクトルとに基づいて、前記カメラの内部パラメータ及び外部パラメータを算出する、

処理を、カメラ校正装置に実行させるプログラムが格納された非一時的なコンピュータ可読媒体。

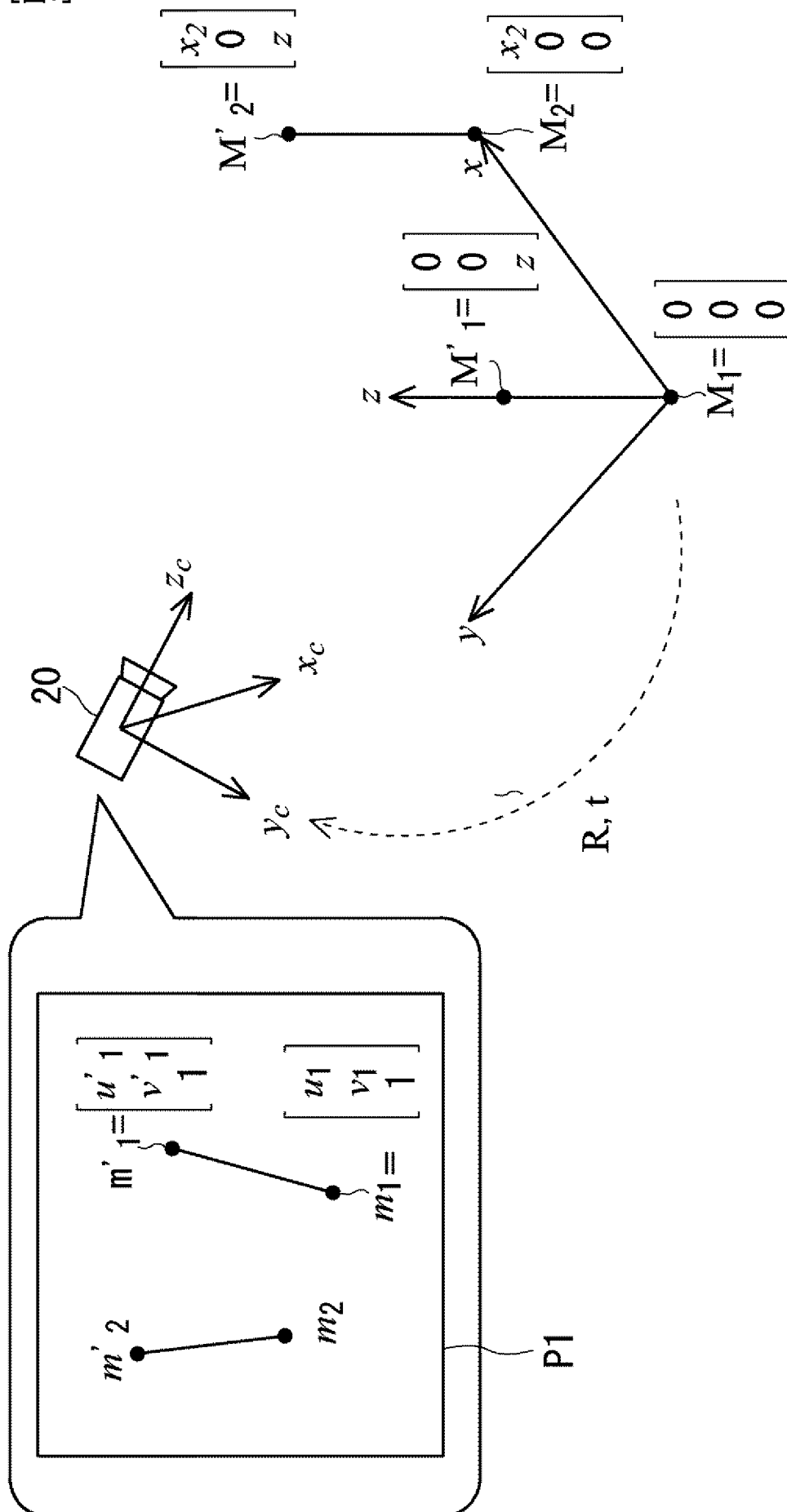
[図1]



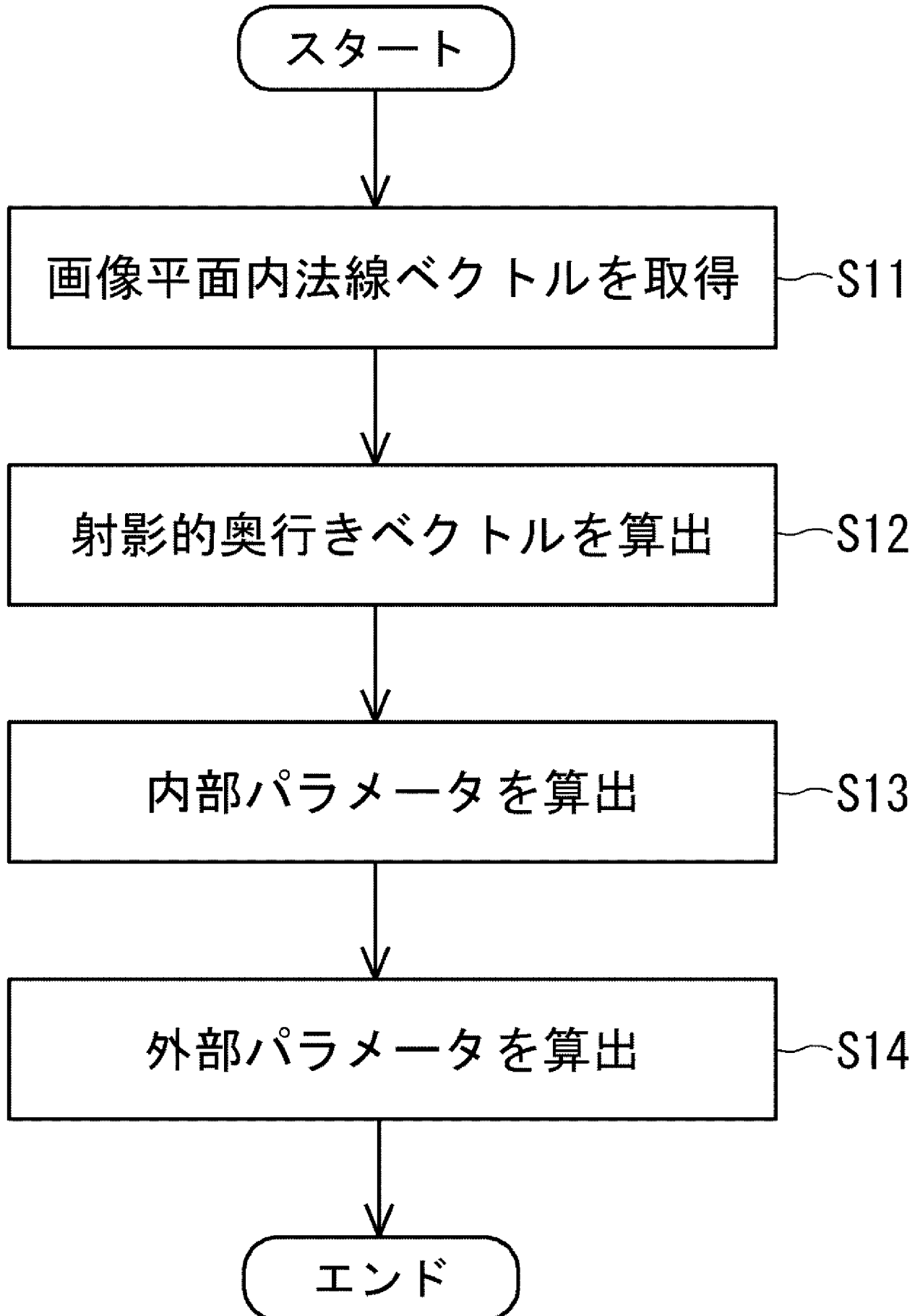
[図2]



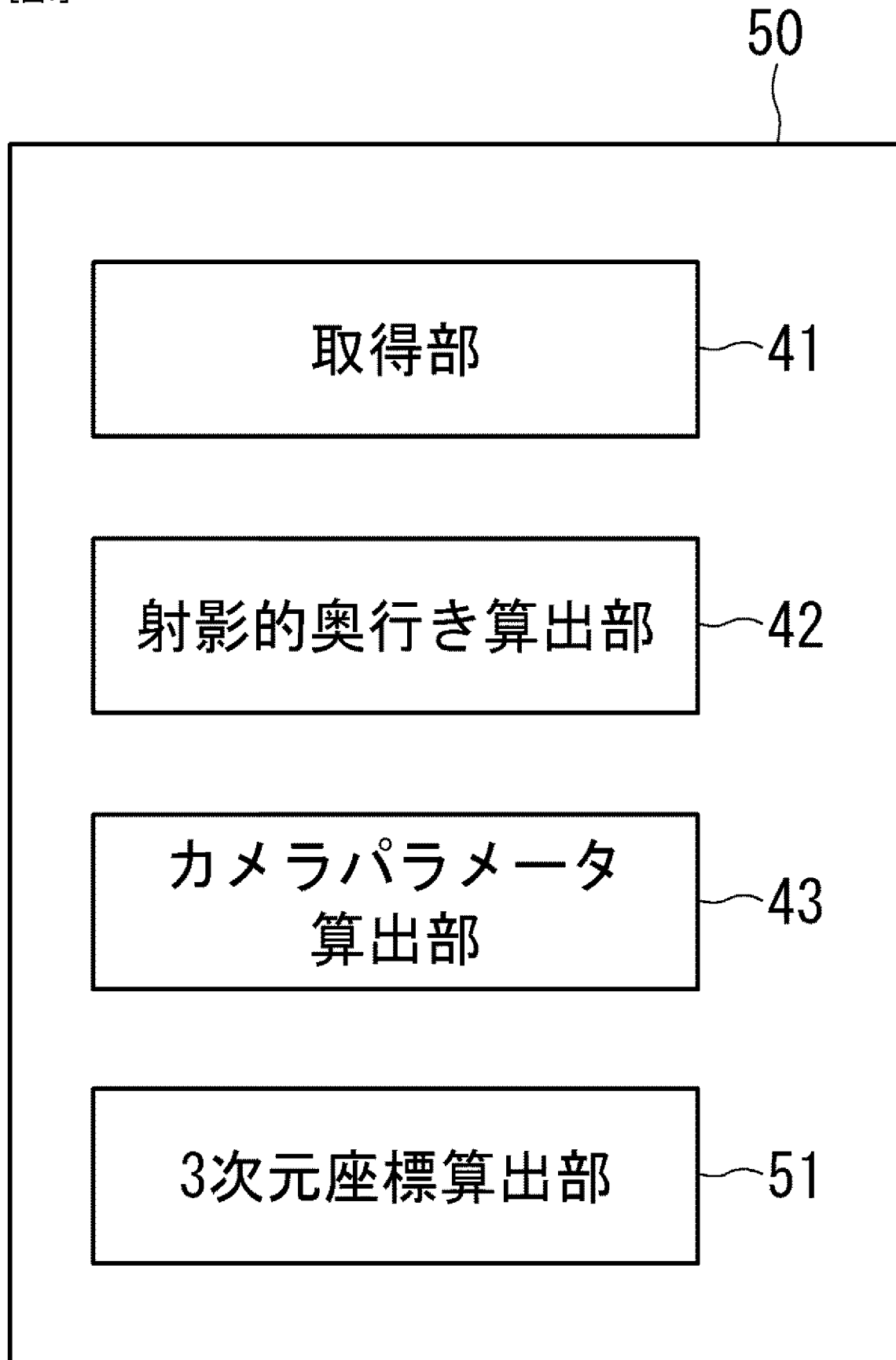
[図3]



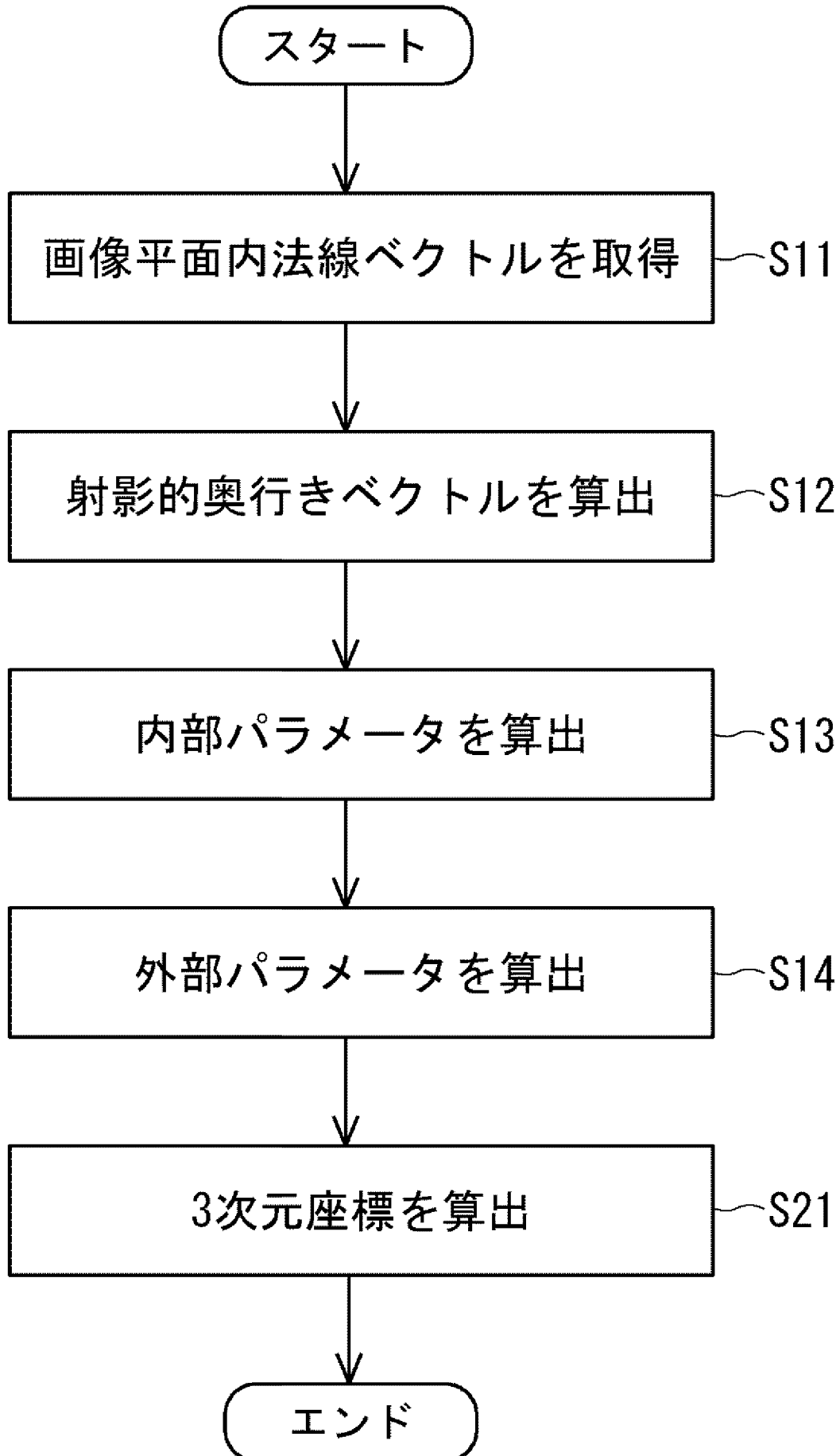
[図4]



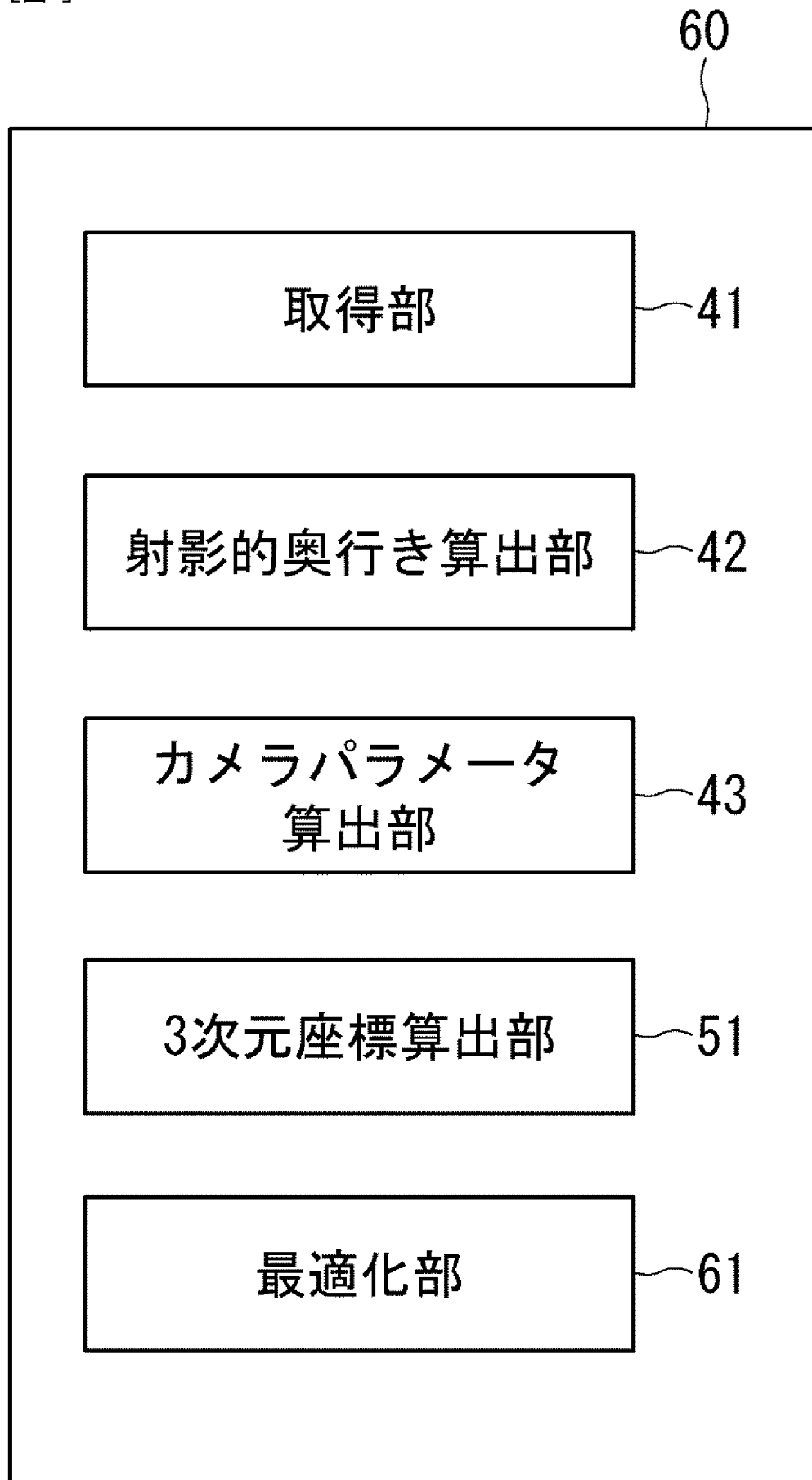
[図5]



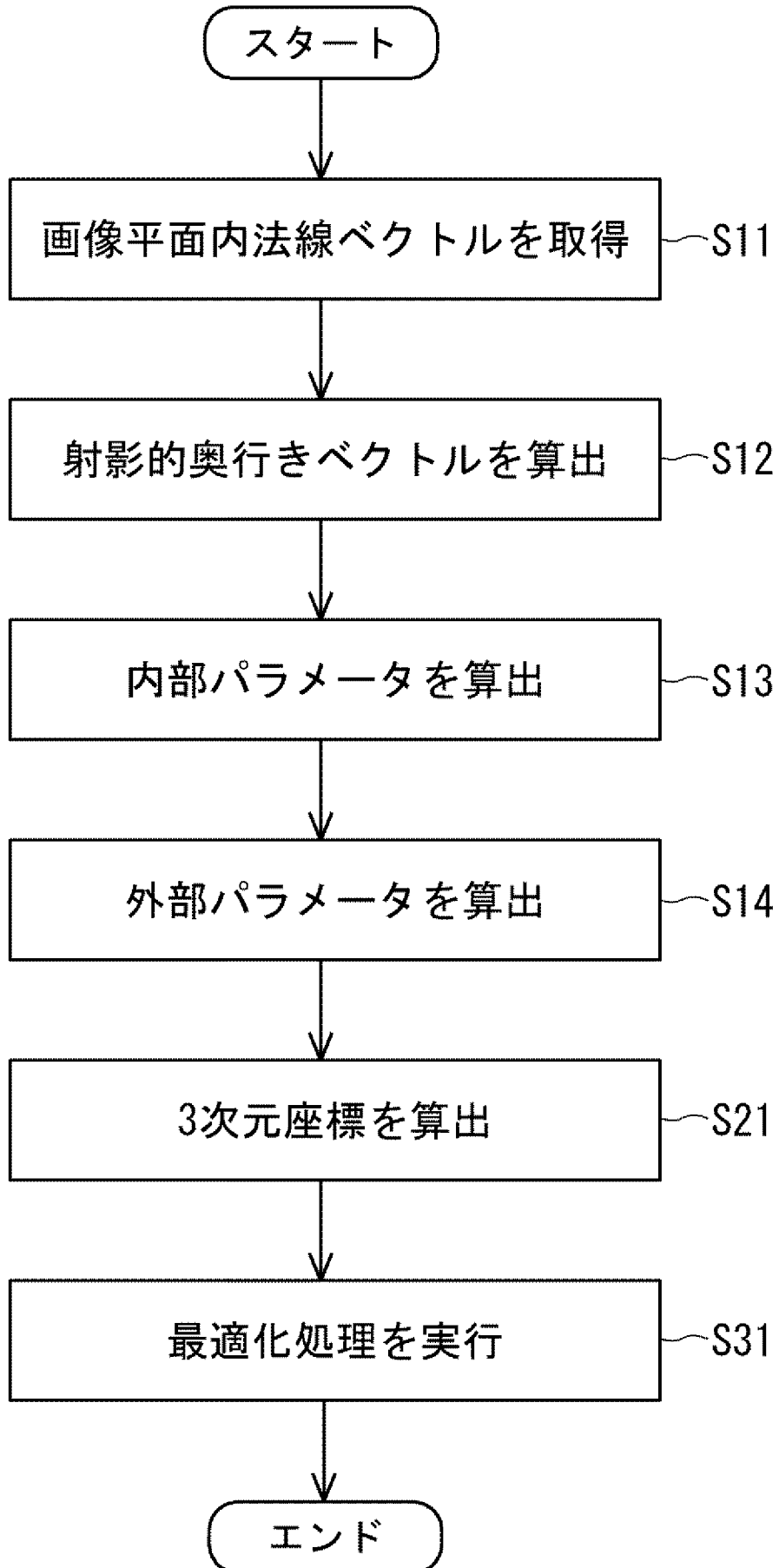
[図6]



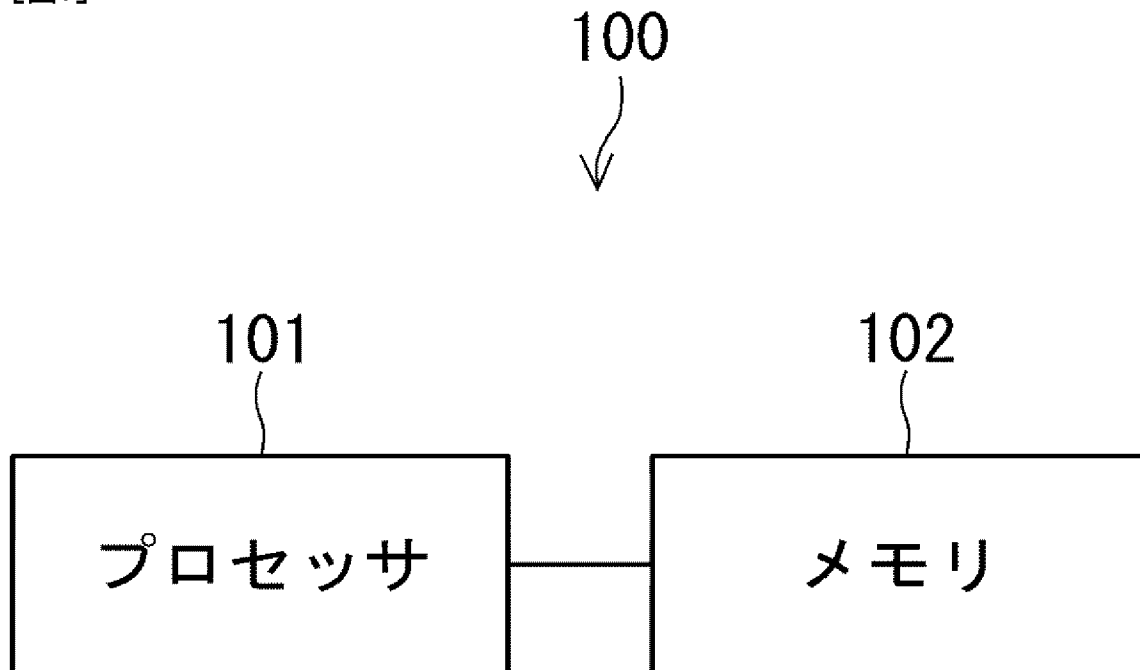
[図7]



[図8]



[図9]



INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No.

PCT/JP2019/015330

A. CLASSIFICATION OF SUBJECT MATTER

Int. Cl. G01B11/00 (2006.01) i

According to International Patent Classification (IPC) or to both national classification and IPC

B. FIELDS SEARCHED

Minimum documentation searched (classification system followed by classification symbols)

Int. Cl. G01B11/00-11/30, G01C3/00, G01C3/06, G01C11/00, G01C15/00

Documentation searched other than minimum documentation to the extent that such documents are included in the fields searched

Published examined utility model applications of Japan 1922-1996

Published unexamined utility model applications of Japan 1971-2019

Registered utility model specifications of Japan 1996-2019

Published registered utility model applications of Japan 1994-2019

Electronic data base consulted during the international search (name of data base and, where practicable, search terms used)

C. DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT

Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
A	WO 2013/111229 A1 (NEC CORP.) 01 August 2013, entire text, all drawings & US 2015/0029345 A1 & EP 2808645 A1	1-15
A	JP 2007-256091 A (SPACE VISION KK) 04 October 2007, entire text, all drawings (Family: none)	1-15
A	JP 2010-181919 A (NATIONAL UNIVERSITY CORPORATION TOYOHASHI UNIVERSITY OF TECHNOLOGY) 19 August 2010, entire text, all drawings (Family: none)	1-15
A	JP 2005-352630 A (PULSTEC INDUSTRIAL CO., LTD.) 22 December 2005, entire text, all drawings (Family: none)	1-15



Further documents are listed in the continuation of Box C.



See patent family annex.

* Special categories of cited documents:

“A” document defining the general state of the art which is not considered to be of particular relevance

“E” earlier application or patent but published on or after the international filing date

“L” document which may throw doubts on priority claim(s) or which is cited to establish the publication date of another citation or other special reason (as specified)

“O” document referring to an oral disclosure, use, exhibition or other means

“P” document published prior to the international filing date but later than the priority date claimed

“T” later document published after the international filing date or priority date and not in conflict with the application but cited to understand the principle or theory underlying the invention

“X” document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered novel or cannot be considered to involve an inventive step when the document is taken alone

“Y” document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered to involve an inventive step when the document is combined with one or more other such documents, such combination being obvious to a person skilled in the art

“&” document member of the same patent family

Date of the actual completion of the international search
25.06.2019

Date of mailing of the international search report
09.07.2019

Name and mailing address of the ISA/
Japan Patent Office
3-4-3, Kasumigaseki, Chiyoda-ku,
Tokyo 100-8915, Japan

Authorized officer

Telephone No.

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No. PCT/JP2019/015330
--

C (Continuation). DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT

Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
A	US 2002/0186897 A1 (KOREA ADVANCED INSTITUTE OF SCIENCE AND TECHNOLOGY) 12 December 2002, entire document & US 2005/0207640 A1 & KR 10-2002-0077685 A	1-15

A. 発明の属する分野の分類（国際特許分類（IPC））

Int.Cl. G01B11/00(2006.01)i

B. 調査を行った分野

調査を行った最小限資料（国際特許分類（IPC））

Int.Cl. G01B11/00-11/30, G01C3/00, G01C3/06, G01C11/00, G01C15/00

最小限資料以外の資料で調査を行った分野に含まれるもの

日本国実用新案公報	1922-1996年
日本国公開実用新案公報	1971-2019年
日本国実用新案登録公報	1996-2019年
日本国登録実用新案公報	1994-2019年

国際調査で使用した電子データベース（データベースの名称、調査に使用した用語）

C. 関連すると認められる文献

引用文献の カテゴリー*	引用文献名 及び一部の箇所が関連するときは、その関連する箇所の表示	関連する 請求項の番号
A	W0 2013/111229 A1（日本電気株式会社）2013.08.01, 全文全図 & US 2015/0029345 A1 & EP 2808645 A1	1-15
A	JP 2007-256091 A（株式会社スペースビジョン）2007.10.04, 全文全図（ファミリーなし）	1-15
A	JP 2010-181919 A（国立大学法人豊橋技術科学大学）2010.08.19, 全文全図（ファミリーなし）	1-15

☒ C欄の続きにも文献が列挙されている。

☐ パテントファミリーに関する別紙を参照。

* 引用文献のカテゴリー

「A」特に関連のある文献ではなく、一般的技術水準を示すもの
「E」国際出願日前の出願または特許であるが、国際出願日以後に公表されたもの
「L」優先権主張に疑義を提起する文献又は他の文献の発行日若しくは他の特別な理由を確立するために引用する文献（理由を付す）
「O」口頭による開示、使用、展示等に言及する文献
「P」国際出願日前で、かつ優先権の主張の基礎となる出願

の日の後に公表された文献

「T」国際出願日又は優先日後に公表された文献であって出願と矛盾するものではなく、発明の原理又は理論の理解のために引用するもの
「X」特に関連のある文献であって、当該文献のみで発明の新規性又は進歩性がないと考えられるもの
「Y」特に関連のある文献であって、当該文献と他の1以上の文献との、当業者にとって自明である組合せによって進歩性がないと考えられるもの
「&」同一パテントファミリー文献

国際調査を完了した日

25.06.2019

国際調査報告の発送日

09.07.2019

国際調査機関の名称及びあて先

日本国特許庁（ISA/J P）

郵便番号100-8915

東京都千代田区霞が関三丁目4番3号

特許庁審査官（権限のある職員）

櫻井 仁

2S

9008

電話番号 03-3581-1101 内線 3216

C (続き) . 関連すると認められる文献		
引用文献の カテゴリー*	引用文献名 及び一部の箇所が関連するときは、その関連する箇所の表示	関連する 請求項の番号
A	JP 2005-352630 A (パルステック工業株式会社) 2005. 12. 22, 全文 全図 (ファミリーなし)	1-15
A	US 2002/0186897 A1 (KOREA ADVANCED INSTITUTE OF SCIENCE AND TECHNOLOGY) 2002. 12. 12, WHOLE DOCUMENTS & US 2005/0207640 A1 & KR 10-2002-0077685 A	1-15