

(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9月24日(24.09.2020)



(10) 国際公開番号

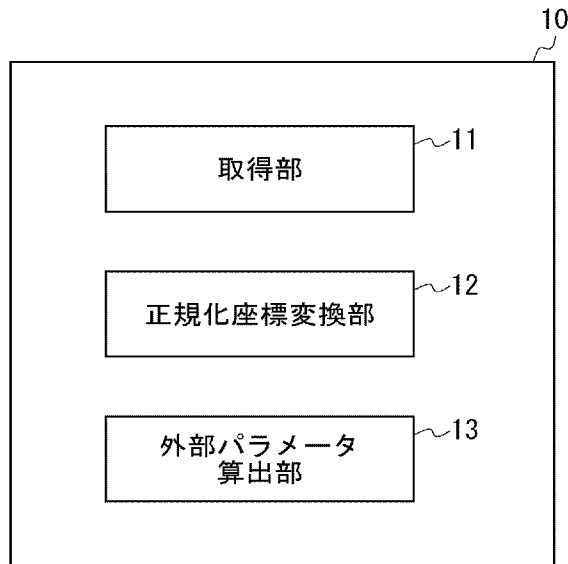
WO 2020/188799 A1

- (51) 国際特許分類:
G01B 11/00 (2006.01) *G06T 7/70* (2017.01)
- (21) 国際出願番号: PCT/JP2019/011764
- (22) 国際出願日: 2019年3月20日(20.03.2019)
- (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1]



- 11 Acquisition unit
- 12 Normalized coordinate conversion unit
- 13 External parameter calculation unit

(57) Abstract: An external parameter calculation unit (13) of a camera calibration device (10) calculates and outputs a rotation vector and a rotation matrix using normalized start point coordinates, normalized end point coordinates, and an "evaluation function" obtained for image plane normal vectors by a normalized coordinate conversion unit (12). The



WO 2020/188799 A1

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))

image plane normal vectors respectively correspond to a plurality of world coordinate space normal vectors to a reference plane in the world coordinate space. The "evaluation function" is a function that is overdetermined for a rotation parameter for rotation around normal lines to the reference plane in the world coordinate space.

(57) 要約: カメラ校正装置 (10) にて外部パラメータ算出部 (13) は、正規化座標変換部 (12) にて各画像平面内法線ベクトルについて得られた正規化始点座標と正規化終点座標と「評価関数」とを用いて、回転ベクトル及び回転行列を算出して出力する。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。「評価関数」は、世界座標空間における上記の基準平面に対する法線周りの回転パラメータについて過決定となる関数である。

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] 内部パラメータが既知という条件の下でカメラ校正を行う方法はPerspective-N-Point (PnP) 問題とも呼ばれる。このPnP問題を解く方法として、種々の方法が提案されている（例えば、特許文献1）。特許文献1に開示されている技術では、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を算出している。

先行技術文献

特許文献

[0004] 特許文献1：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

[0005] 本発明者は、特許文献1に開示されている技術では、上記の評価関数の最小化において観測線分の増加に伴い未知数の方が多くなる、いわゆる劣決定問題になる可能性があることを見出した。劣決定問題の場合、観測する線分の数を増やしても拘束式の数が常に不足し、理論上の最適解が無数存在するため、現実的に不可能なカメラパラメータも最適解になってしまう。すなわち、算出される外部パラメータの精度が劣化する可能性がある。

[0006] 本開示の目的は、外部パラメータを精度良く算出できる、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

[0007] 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、前記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複数の画像平面内法線ベクトルを取得する取得部と、

前記取得部にて取得された各画像平面内法線ベクトルの始点及び終点についての画像平面内座標である画像平面内始点座標及び画像平面内終点座標を、前記カメラの内部パラメータに基づいて、正規化座標である正規化始点座標及び正規化終点座標へ変換する、正規化座標変換部と、

前記正規化座標変換部にて各画像平面内法線ベクトルについて得られた正規化始点座標及び正規化終点座標と、前記世界座標空間における基準平面に

対する法線周りの回転パラメータについて過決定となる評価関数とを用いて、前記カメラについての並進ベクトル及び回転行列を算出して出力する、外部パラメータ算出部と、

を具備する。

[0008] 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、前記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複数の画像平面内法線ベクトルを取得し、

前記取得された各画像平面内法線ベクトルの始点及び終点についての画像平面内座標である画像平面内始点座標及び画像平面内終点座標を、前記カメラの内部パラメータに基づいて、正規化座標である正規化始点座標及び正規化終点座標へ変換し、

各画像平面内法線ベクトルについて得られた正規化始点座標及び正規化終点座標と、前記世界座標空間における基準平面に対する法線周りの回転パラメータについて過決定となる評価関数を用いて、前記カメラについての並進ベクトル及び回転行列を算出する。

[0009] 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、前記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複数の画像平面内法線ベクトルを取得し、

前記取得された各画像平面内法線ベクトルの始点及び終点についての画像平面内座標である画像平面内始点座標及び画像平面内終点座標を、前記カメラの内部パラメータに基づいて、正規化座標である正規化始点座標及び正規化終点座標へ変換し、

各画像平面内法線ベクトルについて得られた正規化始点座標及び正規化終点座標と、前記世界座標空間における基準平面に対する法線周りの回転パラメータについて過決定となる評価関数を用いて、前記カメラについての並進ベクトル及び回転行列を算出する、

処理を、カメラ校正装置に実行させるプログラムを格納する。

発明の効果

[0010] 本開示により、外部パラメータを精度良く算出できる、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

[0011] [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

[0012] 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。

[0013] <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、正規化座標変換部12と、外部パラメータ算出部13とを有している。

[0014] 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。また、世界座標空間内法線ベクトルの始点及び終点は、基準平面上にあってもよいし基準平面上でなくてもよい。

[0015] 正規化座標変換部 12 は、取得部 11 にて取得された各画像平面内法線ベクトルの始点及び終点についての画像平面内座標である、「画像平面内始点座標」及び「画像平面内終点座標」を、カメラ（不図示）の「内部パラメータ」に基づいて、正規化座標である、「正規化始点座標」及び「正規化終点座標」へ変換する。ここでは、カメラ（不図示）の内部パラメータは、既知であり、正規化座標変換部 12 によって取得可能になっている。

[0016] 外部パラメータ算出部 13 は、正規化座標変換部 12 にて各画像平面内法線ベクトルについて得られた正規化始点座標と正規化終点座標と「評価関数」とを用いて、並進ベクトル及び回転行列を算出して出力する。ここで、「評価関数」は、世界座標空間における上記「基準平面」に対する法線周りの回転パラメータについて過決定となる関数である。

[0017] 以上のように第 1 実施形態によれば、カメラ校正装置 10 にて外部パラメータ算出部 13 は、正規化座標変換部 12 にて各画像平面内法線ベクトルについて得られた正規化始点座標と正規化終点座標と「評価関数」とを用いて、回転ベクトル及び回転行列を算出して出力する。「評価関数」は、世界座標空間における上記「基準平面」に対する法線周りの回転パラメータについて過決定となる関数である。

[0018] このカメラ校正装置 10 の構成により、劣決定問題を回避して、外部パラメータを算出することができる。これにより、外部パラメータを精度良く算出することができる。

[0019] <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。

[0020] <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。

[0021] 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。

[0022] 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。

[0023] 図3において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。すなわち、カメラ20の位置は、世界座標系のz座標の1次元で表すことができ、また、カメラ20についての並進ベクトルTも、1次元という少ないパラメータで表現することができる。

[0024] 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xy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。すなわち、カメラ20のヨー回転（つまり、y_c軸周りの回転）が制限されている。これにより、カメラ20の回転行列は、ロール回転（z_c軸周りの回転）及びピッチ回転（x_c軸周りの回転）の2次元で表すことができ、また、カメラ20の回転行列Rも2次元という少ないパラメータで表現することができる。

[0025] 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を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。

[0026] 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。

[0027] <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、正規化座標変換部42と、外部パラメータ算出部43と、記憶部44とを有している。

[0028] 取得部41は、カメラ校正装置40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、カメラ校正装置40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、カメラ校正装置40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、カメラ校正装置40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、取得された複数の画像平面内法線ベクトルに対応する、複数の「世界座標空間内法線ベクトル」の世界座標空間における長さは、互いに異なっていてもよい。また、上記の通り、世界座標空間内法線ベクトルの始点及び終点は、基準平面上にあってもよいし基準平面上でなくてもよい。図3に示した例では、世界座標空間内法線ベクトルの始点は、基準平面上にある。

[0029] 正規化座標変換部42は、第1実施形態の正規化座標変換部12と同様に、取得部41にて取得された各画像平面内法線ベクトルの始点及び終点についての画像平面内座標である、「画像平面内始点座標」及び「画像平面内終点座標」を、カメラ20の「内部パラメータ」に基づいて、正規化座標である、「正規化始点座標」及び「正規化終点座標」へ変換する。カメラ20の「内部パラメータ」は、記憶部44に予め記憶されている。ここで、正規化

座標変換部42は、「画像平面内始点座標」及び「画像平面内終点座標」を齊次化する。具体的には、「画像平面内始点座標」及び「画像平面内終点座標」は、図3の m_i 及び m_i' に示すように、3次元に齊次化される。すなわち、「画像平面内始点座標」及び「画像平面内終点座標」は、2次元の画像座標にスケールの不定性を加えた3次元座標で表される。

[0030] 外部パラメータ算出部43は、第1実施形態の外部パラメータ算出部13と同様に、正規化座標変換部12にて各画像平面内法線ベクトルについて得られた正規化始点座標と正規化終点座標と「評価関数」とを用いて、並進ベクトル及び回転行列を算出して出力する。

[0031] 例えば、外部パラメータ算出部43は、正規化座標変換部42にて各画像平面内法線ベクトルについて得られた正規化始点座標のベクトルと正規化終点座標のベクトルとのクロス積とカメラ20についての回転行列における z_c 軸周りの回転ベクトルとの内積である、スカラー3重積を、複数の画像平面内法線ベクトルについて算出する。そして、外部パラメータ算出部43は、算出した複数のスカラー3重積の総和を上記の評価関数として用いて、該総和を最少化することが期待される所望の z_c 軸周りの回転ベクトルを算出する。そして、外部パラメータ算出部43は、算出した所望の z_c 軸周りの回転ベクトルに基づいて回転行列を算出する。そして、外部パラメータ算出部43は、算出した回転行列を出力すると共に、算出した所望の z_c 軸周りの回転ベクトルをカメラ20についての並進ベクトルとして出力する。ここで、1つの画像平面内法線ベクトルから z_c 軸周りの回転ベクトルに対する1つの拘束条件が得られる。このため、2つ以上の画像平面内法線ベクトルを用いることにより、 z_c 軸周りの回転ベクトルが計算可能となる。さらに、上記の通り、 y_c 軸周りの回転角度は、ゼロとおける。このため、計算された z_c 軸周りの回転ベクトルから、 z_c 軸周りの回転角度及び x_c 軸周りの回転角度が推定可能であるため、 3×3 の回転行列の全体を復元することができる。また、図3を参照して説明したカメラ座標系と世界座標系との関係では、カメラ20の並進ベクトルは、回転行列の z_c 軸周りの回転ベクトルの定数倍に等しい

。さらに、世界座標空間内法線ベクトルの3次元座標が未知なことを利用すると、カメラ20の高さ（z座標）を1としてもよい。すなわち、並進ベクトルは、回転行列の第3列として計算すればよい。なお、この外部パラメータ算出部43による外部パラメータの算出については、後に詳しく説明する。

[0032] <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。

[0033] 取得部41は、カメラ20で撮影された画像から、複数の画像平面内法線ベクトルを取得する（ステップS11）。

[0034] 正規化座標変換部42は、各画像平面内法線ベクトルの画像平面内始点座標及び画像平面内終点座標を、カメラ20の内部パラメータに基づいて、正規化始点座標及び正規化終点座標へ変換する（ステップS12）。

[0035] 外部パラメータ算出部43は、各画像平面内法線ベクトルについて得られた正規化始点座標と正規化終点座標と「評価関数」とを用いて、並進ベクトル及び回転行列を算出する（ステップS13）。

[0036] ここで、外部パラメータ算出部43による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。なお、以下の説明では、図3に示した記号を用いる。すなわち、カメラ20は、世界座標系のz軸上の $c = [0, 0, h]^T$ に位置している。また、世界座標系のxy平面に対するz_c軸の投影は、世界座標系のy軸と重なっている。また、i番目の世界座標空間内法線ベクトルの始点 $M_i = [x_i, y_i, 0]^T$ 及び終点 $M_i' = [x_i, y_i, z_i]^T$ 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。ここで、 m_i 及び m_i' は、内部パラメータにより正規化された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。

[0037] まず、解くべき問題の定義を行うことにする。

[0038] カメラ20の回転行列Rは、上記の通り、y_c軸周りの回転角度をゼロとお

けるため、 x_c 軸周りの回転角度 θ_x 及び z_c 軸周りの回転角度 θ_z を用いて、次の式(1)によって表すことができる。

[数1]

$$\begin{aligned} \mathbf{R} &= \begin{bmatrix} \cos \theta_z & -\sin \theta_z & 0 \\ \sin \theta_z & \cos \theta_z & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \theta_x & -\sin \theta_x \\ 0 & \sin \theta_x & \cos \theta_x \end{bmatrix} \\ &= \begin{bmatrix} \cos \theta_z & -\cos \theta_x \sin \theta_z & \sin \theta_z \sin \theta_x \\ \sin \theta_z & \cos \theta_x \cos \theta_z & -\cos \theta_z \sin \theta_x \\ 0 & \sin \theta_x & \cos \theta_x \end{bmatrix} \cdots (1) \end{aligned}$$

[0039] また、カメラ20の並進ベクトル \mathbf{t} は、カメラ20の位置 \mathbf{c} と回転行列 \mathbf{R} とを用いて、次の式2によって表すことができる。

[数2]

$$\begin{aligned} \mathbf{t} &= -\mathbf{R}\mathbf{c} \\ &= -[\mathbf{r}_1, \mathbf{r}_2, \mathbf{r}_3] \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ h \end{bmatrix} \\ &= -h\mathbf{r}_3 \cdots (2) \end{aligned}$$

ここで、 \mathbf{r}_j は、回転行列 \mathbf{R} の第 j 列目のベクトルを表している。すなわち、式2は、並進ベクトル \mathbf{t} が、 z_c 軸周りの回転ベクトルの定数倍であることを示している。

[0040] 上記の式(1)及び式(2)を用いると、 i 番目の世界座標空間内法線ベクトルと画像平面内法線ベクトルとの射影関係は、次の式(3)によって表される。

[数3]

$$\left. \begin{aligned} \mathbf{m}_i &\propto \mathbf{RM}_i + \mathbf{t} \quad (= \mathbf{RM}_i - h\mathbf{r}_3) \\ \mathbf{m}'_i &\propto \mathbf{RM}'_i + \mathbf{t} \quad (= \mathbf{RM}'_i - h\mathbf{r}_3) \end{aligned} \right\} \dots (3)$$

ここで、記号 \propto は、左辺と右辺が定数倍に不定であることを示す。

[0041] ここで、本実施の形態では、世界座標系を任意に設定できるため、世界座標空間内法線ベクトルの始点及び終点の3次元座標 x_i, y_i, z_i ($2 \leq i \leq n$) とカメラの高さ h との間には、定数倍の不定性が存在する。すなわち、世界座標空間に対する既知の情報（例えば、ある1つの世界座標空間内法線ベクトルのメートル単位での長さ）が与えられない限り、世界座標空間における絶対的な位置関係は不明で、相対的な位置関係のみが求められる。換言すれば、相対的な大きさは、任意に決定できる。そこで、カメラの高さを $h = 1$ とおくと、式(3)は、次の式(4)のように表すことができる。

[数4]

$$\left. \begin{aligned} \mathbf{m}_i &\propto \mathbf{RM}_i - \mathbf{r}_3 \\ \mathbf{m}'_i &\propto \mathbf{RM}'_i - \mathbf{r}_3 \end{aligned} \right\} \dots (4)$$

[0042] 式(4)より、 n 個の画像平面内法線ベクトルを取得できた場合、その未知数の個数は、 $2 + 3n$ 個である (x_0 軸周りの回転角度 θ_x 及び z_0 軸周りの回転角度 θ_z 、並びに、各世界座標空間内法線ベクトルの始点及び終点の3次元座標 x_i, y_i, z_i)。一方、1つの画像平面内法線ベクトルから得られる条件数は、4個 (u_i, v_i, u'_i, v'_i) であるため、 n 個の画像平面内法線ベクトルを取得できた場合の条件数は、 $4n$ 個である。すなわち、 n が2以上のとき、条件数が未知数を上回る ($4n > 2 + 3n$) ことになり、問題を解くことが可能になる。

[0043] 続いて、式(4)を解くことにより、回転行列 R 及び並進ベクトル t を算

出す方法について説明する。

[0044] 射影的奥行き λ 、 λ' を用いて、式 (4) の両辺の不定性を除くと、次の式 (5) で表される。

[数5]

$$\left. \begin{aligned} \lambda \mathbf{m}_i &= \mathbf{R} \mathbf{M}_i - \mathbf{r}_3 \\ \lambda' \mathbf{m}'_i &= \mathbf{R} \mathbf{M}'_i - \mathbf{r}_3 \end{aligned} \right\} \cdot \cdot \cdot (5)$$

[0045] 式 (5) における上式と下式との差分は、次の式 (6) によって表される。

[数6]

$$\begin{aligned} \lambda' \mathbf{m}'_i - \lambda \mathbf{m}_i &= \mathbf{R} (\mathbf{M}'_i - \mathbf{M}_i) \\ &= \mathbf{R} \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ z_i \end{bmatrix} \\ &= z_i \mathbf{r}_3 \quad \cdot \cdot \cdot (6) \end{aligned}$$

[0046] 式 (6) は、3つのベクトル \mathbf{m}_i 、 \mathbf{m}'_i 及び \mathbf{r}_3 が、互いに線形従属であることを示している。すなわち、式 (7) に示すように、これら3つのベクトルのスカラー3重積は、ゼロである。

[数7]

$$(\mathbf{m}_i \times \mathbf{m}'_i)^T \mathbf{r}_3 = 0 \quad \cdot \cdot \cdot (7)$$

[0047] 1つの画像平面内法線ベクトル毎に、式 (7) が得られる。

[0048] 従って、2つの画像平面内法線ベクトルが取得できた場合、 \mathbf{r}_3 は、次の式 (8) に表すように、ベクトルのクロス積を用いて、算出することができる

。

[数8]

$$\begin{bmatrix} (\mathbf{m}_1 \times \mathbf{m}'_1)^T \\ (\mathbf{m}_2 \times \mathbf{m}'_2)^T \end{bmatrix} \mathbf{r}_3 = 0 \Rightarrow \mathbf{r}_3 = \frac{(\mathbf{m}_1 \times \mathbf{m}'_1) \times (\mathbf{m}_2 \times \mathbf{m}'_2)}{\|(\mathbf{m}_1 \times \mathbf{m}'_1) \times (\mathbf{m}_2 \times \mathbf{m}'_2)\|} \dots (8)$$

[0049] また、n個の画像平面内法線ベクトルが取得できた場合、次の式(9)に示す最小二乗法によって、 \mathbf{r}_3 は算出することができる。

[数9]

$$\min_{\mathbf{r}_3} \left\| \begin{bmatrix} (\mathbf{m}_1 \times \mathbf{m}'_1)^T \\ \vdots \\ (\mathbf{m}_n \times \mathbf{m}'_n)^T \end{bmatrix} \mathbf{r}_3 \right\|^2 \quad s.t. \quad \|\mathbf{r}_3\| = 1 \dots (9)$$

[0050] 以上のように、回転行列Rの第3列目 \mathbf{r}_3 を算出することができる。

[0051] 上記の式(1)に示したように、回転行列Rの第3列目 \mathbf{r}_3 は、 θ_x 及び θ_z を用いて陽に表されている。すなわち、 \mathbf{r}_3 の各成分から逆三角関数を用いて、 θ_x 及び θ_z を算出することができる。回転行列Rは、 x_c 軸周りの回転及び z_c 軸周りの回転のみで表されているため、 θ_x 及び θ_z を算出できれば、回転行列Rの全成分を算出することができる。

[0052] ここで、式(8)及び式(9)は、2つ以上の画像平面内法線ベクトルを取得できれば、回転行列を推定可能であることを示している。また、取得される画像平面内法線ベクトルの数が増えても、その未知数は、回転行列の第3列のみである。式(9)は、数値的に安定な線形最小二乗法であり、nが大きいほど安定する。従って、上記の特許文献1で用いられている評価関数と異なり、取得する画像平面内法線ベクトルの数が多ければ、より高精度に回転行列を求めることができる。

[0053] 並進ベクトル \mathbf{t} は、回転行列Rの第3列 \mathbf{r}_3 そのものであるから、回転行列Rの計算と同時にすでに計算されたことになる。

[0054] 以上のように第2実施形態によれば、カメラ校正装置40にて外部パラメータ算出部43は、正規化座標変換部42にて各画像平面内法線ベクトルに

ついて得られた正規化始点座標のベクトルと正規化終点座標のベクトルとのクロス積とカメラ20についての回転行列における z 。軸周りの回転ベクトルとの内積である、スカラー3重積を、複数の画像平面内法線ベクトルについて算出する。そして、外部パラメータ算出部43は、算出した複数のスカラー3重積の総和を上記の評価関数として用いて、該総和を最少化することが期待される所望の z 。軸周りの回転ベクトルを算出する。そして、外部パラメータ算出部43は、算出した所望の z 。軸周りの回転ベクトルに基づいて回転行列を算出する。そして、外部パラメータ算出部43は、算出した回転行列を出力すると共に、算出した所望の z 。軸周りの回転ベクトルをカメラ20についての並進ベクトルとして出力する。

[0055] このカメラ校正装置40の構成により、劣決定問題を回避して、外部パラメータを算出することができる。これにより、外部パラメータを精度良く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。

[0056] <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。

[0057] <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、ある1つの世界座標空間内法線ベクトルの始点を世界座標系の原点とし、別の世界座標空間内法線ベクトルを x 軸上に乗るようにしてもよい。その場合、 $M_1 = [0, 0, 0]^T$ 、 $M_1' = [0, 0, z_1]^T$ 、 $M_2 = [0, y_2, 0]^T$ 、 $M_1' = [0, y_2, z_2]^T$ となり、並進ベクトル t は、回転行列の第3列とはならない。しかし、未知数の数は変わらないため、2つ以上の画像平面内法線ベクトルが取得できれば、回転行列及び並進ベクトルを求めることができる。異なる3次元座標系は剛体変換によって一致できるため、原点の設定により解くべき未知数が変わったとしても数学的には等価な問題である。

[0058] <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。

[0059] <3>回転行列の表現方法は、上記の式(1)に限定されない。例えば、y軸周りの成分をゼロとした四元数を用いてもよい。

[0060] <4>回転行列の第3列の計算方法は、式(8)または式(9)に限定されない。式(8)及び式(9)は、画像平面内法線ベクトル同士の交点、つまり、垂直方向の消失点を求めていることに等しい。そのため、垂直方向の消失点を計算する様々な方法を代替に用いてもよい。また、式(9)はいわゆる代数的誤差を最小化しているが、幾何学的誤差や Sampson 誤差といったより高度な誤差解析方法を用いてもよい。さらに、公知である RANSAC (Random Sample Consensus) や重み付き最小二乗法を式(8)及び式(9)と組み合わせて、誤差の大きい画像平面内法線ベクトルを除去しながら、消失点を計算してもよい。

[0061] <5>世界座標空間内法線ベクトルの始点のz座標は、ゼロに限定されない。すなわち、世界座標空間内法線ベクトルは必ずしも基準平面に接している必要はない。なぜならば、式(6)から式(7)への導出で示したように、z座標の値は消去されるため、式(8)及び式(9)へ影響を与えないからである。

[0062] <第3実施形態>

第3実施形態は、画像平面内法線ベクトルと、回転行列及び並進ベクトルとに基づいて、各画像平面内法線ベクトルの正規化始点座標及び正規化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、実施形態に関する。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。

[0063] <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。

[0064] 3次元座標算出部51は、取得部41にて取得された複数の画像平面内法線ベクトルと、外部パラメータ算出部43にて算出された回転行列及び並進ベクトルとに基づき、各画像平面内法線ベクトルの正規化始点座標及び正規化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。

[0065] 3次元座標算出部51は、上記の式(4)を変形することによって得られる、次の式(10)を用いて、上記の3次元座標を算出することができる。

[0066] [数10]

$$\mathbf{m}_i \times (x_i \mathbf{r}_1 + y_i \mathbf{r}_2 - \mathbf{r}_3) = \mathbf{0}$$

$$\mathbf{m}'_i \times (x_i \mathbf{r}_1 + y_i \mathbf{r}_2 + z_i \mathbf{r}_3 - \mathbf{r}_3) = \mathbf{0}$$

$$\Leftrightarrow \begin{bmatrix} \mathbf{m}_i \times \mathbf{r}_1 & \mathbf{m}_i \times \mathbf{r}_2 & \mathbf{0} \\ \mathbf{m}'_i \times \mathbf{r}_1 & \mathbf{m}'_i \times \mathbf{r}_2 & \mathbf{m}'_i \times \mathbf{r}_3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_i \\ y_i \\ z_i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{m}_i \times \mathbf{r}_3 \\ \mathbf{m}'_i \times \mathbf{r}_3 \end{bmatrix} \cdots (10)$$

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、 \mathbf{m}_i 及び \mathbf{m}'_i は、 i 番目の画像平面内法線ベクトルの正規化始点座標及び正規化終点座標を表し、 $[x_i, y_i, z_i]$ は、算出対象の3次元座標を表す。

[0067] 式(10)は、 $[x_i, y_i, z_i]^T$ を未知数とする線形連立方程式であるので、容易に解くことができる。

[0068] <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S13は、図4のフローチャートと同じである。

[0069] 3次元座標算出部51は、ステップS11にて取得された画像平面内法線ベクトルと、ステップS13にて算出された回転行列及び並進ベクトルとに基づき、各画像平面内法線ベクトルの正規化始点座標及び正規化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(ステップS21)。

[0070] <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。

[0071] <1>各画像平面内法線ベクトルの正規化始点座標及び正規化終点座標についての、世界座標系における2つの3次元座標を算出ために、式(4)を利用したが、これに限定されるものではない。例えば、式(5)を変形した式によって、射影的奥行きも含めて3次元座標を計算してもよい。

[0072] <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回転行列及び並進ベクトルとに加えて、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次元座標とカメラの高さh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。

[0073] <第4実施形態>

第4実施形態は、回転行列、並進ベクトル、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。

[0074] <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。

[0075] 最適化部61は、回転行列、並進ベクトル、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、「最適化処理」にて、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上記2つの3次元座標を外部パラメータ算出部43から出力された回転行列及び並進ベクトル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、算出した各画像平面内法線ベクトルについての2つの「再投影座標」と各画像平面内法線ベクトルの正規化始点座標及び正規化終点座標との誤差である「再投影誤差」を最少化することが期待される、調整後の回転行列、調整後の並進ベクトル、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、回転行列、並進ベクトル、及び、上記2つの3次元座標が高精度化される。

[0076] 例えば、最適化部61は、次の式(11)に基づいて、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上記2つの3次元座標と外部パラメータ算出部43から出力された回転行列及び並進ベクトル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。

[0077] [数11]

$$\min_{\theta_x, \theta_z, x_i, y_i, z_i} \sum_{i \in n} \| \mathbf{m}_i - Proj(\mathbf{R}\mathbf{M}_i - \mathbf{r}_3) \|^2 + \| \mathbf{m}'_i - Proj(\mathbf{R}\mathbf{M}'_i - \mathbf{r}_3) \|^2 \quad \dots (11)$$

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、回転行列を表し、 \mathbf{r}_3 は、並進ベクトルを表し、 \mathbf{m}_i 及び \mathbf{m}'_i は、i番目の画像平面内法線ベクトルの正規化始点座標及び正規化終点座標を表し、 \mathbf{M}_i 及び \mathbf{M}'_i は、i番目の画像平面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、 θ_z は、前記カメラ座標系の第1軸周りの回転角度を表

し、 θ_x は、前記カメラ座標系の第1軸以外の第2軸周りの回転角度を表し、 x_i, y_i, z_i は、 i 番目の画像平面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、 $\| \quad \|$ は、ノルムを表す。

[0078] ここで、上記の式(8)～(10)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、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(11)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。

[0079] <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。

[0080] 最適化部61は、ステップS13にて算出された回転行列及び並進ベクトル、並びに、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)。

[0081] <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。

[0082] 上記の式(11)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(11)の最適化を行うことができる。

[0083] <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 Pr

rocessing 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。

[0084] 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、正規化座標変換部12, 42と、外部パラメータ算出部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。記憶部44は、メモリ102によって実現されてもよい。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 1 0, 4 0, 5 0, 6 0 に供給できる。

[0085] 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。

[0086] 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。

[0087] (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、前記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複数の画像平面内法線ベクトルを取得する取得部と、

前記取得部にて取得された各画像平面内法線ベクトルの始点及び終点についての画像平面内座標である画像平面内始点座標及び画像平面内終点座標を、前記カメラの内部パラメータに基づいて、正規化座標である正規化始点座標及び正規化終点座標へ変換する、正規化座標変換部と、

前記正規化座標変換部にて各画像平面内法線ベクトルについて得られた正規化始点座標及び正規化終点座標と、前記世界座標空間における基準平面に対する法線周りの回転パラメータについて過決定となる評価関数とを用いて、前記カメラについての並進ベクトル及び回転行列を算出して出力する、外部パラメータ算出部と、

を具備するカメラ校正装置。

[0088] (付記 2)

前記外部パラメータ算出部は、

前記正規化座標変換部にて各画像平面内法線ベクトルについて得られた前記正規化始点座標のベクトルと前記正規化終点座標のベクトルとのクロス積と前記カメラについての回転行列におけるカメラ座標系の第 1 軸についての軸周りの回転ベクトルとの内積である、スカラー 3 重積を、前記複数の画像平面内法線ベクトルについて算出し、

前記算出された複数のスカラー 3 重積の総和を前記評価関数として用いて

、前記総和を最少化することが期待される所望の前記回転ベクトルを算出すると共に前記算出された所望の回転ベクトルに基づいて前記回転行列を算出し、

前記算出された回転行列を出力すると共に前記算出された所望の回転ベクトルを前記カメラについての並進ベクトルとして出力する、

付記 1 記載のカメラ校正装置。

[0089] (付記 3)

前記複数の画像平面内法線ベクトルは、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であり、

前記外部パラメータ算出部は、次の式に基づいて、前記回転ベクトルを算出する、

付記 2 記載のカメラ校正装置。

[数12]

$$\mathbf{r} = \frac{(\mathbf{m}_1 \times \mathbf{m}'_1) \times (\mathbf{m}_2 \times \mathbf{m}'_2)}{\|(\mathbf{m}_1 \times \mathbf{m}'_1) \times (\mathbf{m}_2 \times \mathbf{m}'_2)\|}$$

ただし、 \mathbf{r} は、前記回転ベクトルを表し、 \mathbf{m}_1 及び \mathbf{m}'_1 は、前記第 1 画像平面内法線ベクトルの正規化始点座標及び正規化終点座標を表し、 \mathbf{m}_2 及び \mathbf{m}'_2 は、前記第 2 画像平面内法線ベクトルの正規化始点座標及び正規化終点座標を表し、 $\| \quad \|$ は、ノルムを表す。

[0090] (付記 4)

前記カメラ座標系は、前記カメラ座標系の前記第 1 軸が前記カメラの光軸に対応し、前記カメラ座標系の原点が世界座標系の第 1 軸上に存在し、且つ、前記世界座標系の第 2 軸及び第 3 軸による平面に対する、前記カメラ座標系の前記第 1 軸の投影が、前記世界座標系の前記第 2 軸と重なるように、定義されている、

付記 2 又は 3 に記載のカメラ校正装置。

[0091] (付記 5)

前記取得部にて取得された複数の画像平面内法線ベクトルと、前記外部パラメータ算出部にて算出された回転行列及び並進ベクトルとに基づいて、各画像平面内法線ベクトルの正規化始点座標及び正規化終点座標についての、前記世界座標系における相対的な2つの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4記載のカメラ校正装置。

[0092] (付記6)

前記3次元座標算出部は、次の式に基づいて、各画像平面内法線ベクトルの正規化始点座標及び正規化終点座標についての、前記世界座標系における相対的な2つの3次元座標を算出する、

付記5記載のカメラ校正装置。

[数13]

$$\begin{bmatrix} \mathbf{m}_i \times \mathbf{r}_1 & \mathbf{m}_i \times \mathbf{r}_2 & \mathbf{0} \\ \mathbf{m}'_i \times \mathbf{r}_1 & \mathbf{m}'_i \times \mathbf{r}_2 & \mathbf{m}'_i \times \mathbf{r}_3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_i \\ y_i \\ z_i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{m}_i \times \mathbf{r}_3 \\ \mathbf{m}'_i \times \mathbf{r}_3 \end{bmatrix}$$

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、 m_i 及び m'_i は、 i 番目の画像平面内法線ベクトルの正規化始点座標及び正規化終点座標を表し、 $[x_i, y_i, z_i]$ は、算出対象の3次元座標を表す。

[0093] (付記7)

前記取得部にて取得された複数の画像平面内法線ベクトルと、前記外部パラメータ算出部にて算出された回転行列及び並進ベクトルと、前記複数の画像平面内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前記カメラ座標系の原点の前記世界座標系の第1軸上の座標とに基づいて、各画像平面内法線ベクトルの正規化始点座標及び正規化終点座標についての、前記世界座標系における絶対的な2つの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4記載のカメラ校正装置。

[0094] (付記8)

前記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前記2つの3次元座標を前記外部パラメータ算出部から出力された回転行列及び並進ベクトル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各画像平面内法線ベクトルの正規化始点座標及び正規化終点座標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、調整後の回転行列、調整後の並進ベクトル、及び、調整後の前記2つの3次元座標を求めることにより、前記回転行列、前記並進ベクトル、及び、前記2つの3次元座標を最適化する、最適化部を具備する、

付記5から7のいずれか1項に記載のカメラ校正装置。

[0095] (付記9)

前記最適化部は、次の式に基づいて、前記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前記2つの3次元座標と前記外部パラメータ算出部から出力された回転行列及び並進ベクトル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、前記回転行列、前記並進ベクトル、及び、前記2つの3次元座標を最適化する、

付記8に記載のカメラ校正装置。

[数14]

$$\min_{\theta_x, \theta_z, x_i, y_i, z_i (i \in n)} \sum_{i=1}^n \| \mathbf{m}_i - \text{Proj}(\mathbf{R}\mathbf{M}_i - \mathbf{r}_3) \|^2 + \| \mathbf{m}'_i - \text{Proj}(\mathbf{R}\mathbf{M}'_i - \mathbf{r}_3) \|^2$$

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、斉次座標系へ変換する関数を表し、Rは、回転行列を表し、 \mathbf{r}_3 は、並進ベクトルを表し、 \mathbf{m}_i 及び \mathbf{m}'_i は、i番目の画像平面内法線ベクトルの正規化始点座標及び正規化終点座標を表し、 \mathbf{M}_i 及び \mathbf{M}'_i は、i番目の画像平面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、 θ_z は、前記カメラ座標系の第1軸周りの回転角度を表し、 θ_x は、前記カメラ座標系の第1軸以外の第2軸周りの回転角度を表し、 x_i 、 y_i 、 z_i は、i番目の画像平面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、 $\| \quad \|$ は、ノルムを表す。

[0096] (付記 10)

付記 1 から 9 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。

[0097] (付記 11)

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、前記
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複数の画像平面内法線ベクトルを取得し、

前記取得された各画像平面内法線ベクトルの始点及び終点についての画像
平面内座標である画像平面内始点座標及び画像平面内終点座標を、前記カメ
ラの内部パラメータに基づいて、正規化座標である正規化始点座標及び正規
化終点座標へ変換し、

各画像平面内法線ベクトルについて得られた正規化始点座標及び正規化終
点座標と、前記世界座標空間における基準平面に対する法線周りの回転パラ
メータについて過決定となる評価関数を用いて、前記カメラについての並進
ベクトル及び回転行列を算出する、

カメラ校正方法。

[0098] (付記 12)

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、前記
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複数の画像平面内法線ベクトルを取得し、

前記取得された各画像平面内法線ベクトルの始点及び終点についての画像
平面内座標である画像平面内始点座標及び画像平面内終点座標を、前記カメ
ラの内部パラメータに基づいて、正規化座標である正規化始点座標及び正規
化終点座標へ変換し、

各画像平面内法線ベクトルについて得られた正規化始点座標及び正規化終
点座標と、前記世界座標空間における基準平面に対する法線周りの回転パラ

メータについて過決定となる評価関数を用いて、前記カメラについての並進ベクトル及び回転行列を算出する、

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

- [0099] 1 カメラシステム
- 1 0 カメラ校正装置
 - 1 1 取得部
 - 1 2 正規化座標変換部
 - 1 3 外部パラメータ算出部
- 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 正規化座標変換部
 - 4 3 外部パラメータ算出部
 - 4 4 記憶部
 - 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、前記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複数の画像平面内法線ベクトルを取得する取得部と、

前記取得部にて取得された各画像平面内法線ベクトルの始点及び終点についての画像平面内座標である画像平面内始点座標及び画像平面内終点座標を、前記カメラの内部パラメータに基づいて、正規化座標である正規化始点座標及び正規化終点座標へ変換する、正規化座標変換部と、

前記正規化座標変換部にて各画像平面内法線ベクトルについて得られた正規化始点座標及び正規化終点座標と、前記世界座標空間における基準平面に対する法線周りの回転パラメータについて過決定となる評価関数とを用いて、前記カメラについての並進ベクトル及び回転行列を算出して出力する、外部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] 前記外部パラメータ算出部は、

前記正規化座標変換部にて各画像平面内法線ベクトルについて得られた前記正規化始点座標のベクトルと前記正規化終点座標のベクトルとのクロス積と前記カメラについての回転行列におけるカメラ座標系の第1軸についての軸周りの回転ベクトルとの内積である、スカラー3重積を、前記複数の画像平面内法線ベクトルについて算出し、

前記算出された複数のスカラー3重積の総和を前記評価関数として用いて、前記総和を最少化することが期待される所望の前記回転ベクトルを算出すると共に前記算出された所望の回転ベクトルに基づいて前記回転行列を算出し、

前記算出された回転行列を出力すると共に前記算出された所望の回転ベクトルを前記カメラについての並進ベクトルとして出力する、

請求項 1 記載のカメラ校正装置。

[請求項3] 前記複数の画像平面内法線ベクトルは、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であり、

前記外部パラメータ算出部は、次の式に基づいて、前記回転ベクトルを算出する、

請求項 2 記載のカメラ校正装置。

[数1]

$$\mathbf{r} = \frac{(\mathbf{m}_1 \times \mathbf{m}'_1) \times (\mathbf{m}_2 \times \mathbf{m}'_2)}{\|(\mathbf{m}_1 \times \mathbf{m}'_1) \times (\mathbf{m}_2 \times \mathbf{m}'_2)\|}$$

ただし、 \mathbf{r} は、前記回転ベクトルを表し、 \mathbf{m}_1 及び \mathbf{m}'_1 は、前記第 1 画像平面内法線ベクトルの正規化始点座標及び正規化終点座標を表し、 \mathbf{m}_2 及び \mathbf{m}'_2 は、前記第 2 画像平面内法線ベクトルの正規化始点座標及び正規化終点座標を表し、 $\| \quad \|$ は、ノルムを表す。

[請求項4] 前記カメラ座標系は、前記カメラ座標系の前記第 1 軸が前記カメラの光軸に対応し、前記カメラ座標系の原点が世界座標系の第 1 軸上に存在し、且つ、前記世界座標系の第 2 軸及び第 3 軸による平面に対する、前記カメラ座標系の前記第 1 軸の投影が、前記世界座標系の前記第 2 軸と重なるように、定義されている、

請求項 2 又は 3 に記載のカメラ校正装置。

[請求項5] 前記取得部にて取得された複数の画像平面内法線ベクトルと、前記外部パラメータ算出部にて算出された回転行列及び並進ベクトルとに基づいて、各画像平面内法線ベクトルの正規化始点座標及び正規化終点座標についての、前記世界座標系における相対的な 2 つの 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 4 記載のカメラ校正装置。

[請求項6] 前記 3 次元座標算出部は、次の式に基づいて、各画像平面内法線ベクトルの正規化始点座標及び正規化終点座標についての、前記世界座

標系における相対的な2つの3次元座標を算出する、

請求項5記載のカメラ校正装置。

[数2]

$$\begin{bmatrix} \mathbf{m}_i \times \mathbf{r}_1 & \mathbf{m}_i \times \mathbf{r}_2 & \mathbf{0} \\ \mathbf{m}'_i \times \mathbf{r}_1 & \mathbf{m}'_i \times \mathbf{r}_2 & \mathbf{m}'_i \times \mathbf{r}_3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_i \\ y_i \\ z_i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{m}_i \times \mathbf{r}_3 \\ \mathbf{m}'_i \times \mathbf{r}_3 \end{bmatrix}$$

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、 m_i 及び m'_i は、 i 番目の画像平面内法線ベクトルの正規化始点座標及び正規化終点座標を表し、 $[x_i, y_i, z_i]$ は、算出対象の3次元座標を表す。

[請求項7]

前記取得部にて取得された複数の画像平面内法線ベクトルと、前記外部パラメータ算出部にて算出された回転行列及び並進ベクトルと、前記複数の画像平面内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前記カメラ座標系の原点の前記世界座標系の第1軸上の座標とに基づいて、各画像平面内法線ベクトルの正規化始点座標及び正規化終点座標についての、前記世界座標系における絶対的な2つの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4記載のカメラ校正装置。

[請求項8]

前記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前記2つの3次元座標を前記外部パラメータ算出部から出力された回転行列及び並進ベクトル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各画像平面内法線ベクトルの正規化始点座標及び正規化終点座標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、調整後の回転行列、調整後の並進ベクトル、及び、調整後の前記2つの3次元座標を求めることにより、前記回転行列、前記並進ベクトル、及び、前記2つの3次元座標を最適化する、最適化部を具備する、

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]

前記最適化部は、次の式に基づいて、前記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前記2つの3次元座標と前記外部パラメータ算出部から出力された回転行列及び並進ベクトル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、前記回転行列、前記並進ベクトル、及び、前記2つの3次元座標を最適化する、

請求項8に記載のカメラ校正装置。

[数3]

$$\min_{\theta_x, \theta_z, x_i, y_i, z_i (i \in n)} \sum_{i=1}^n \| \mathbf{m}_i - \text{Proj}(\mathbf{R}\mathbf{M}_i - \mathbf{r}_3) \|^2 + \| \mathbf{m}'_i - \text{Proj}(\mathbf{R}\mathbf{M}'_i - \mathbf{r}_3) \|^2$$

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、回転行列を表し、 \mathbf{r}_3 は、並進ベクトルを表し、 \mathbf{m}_i 及び \mathbf{m}'_i は、i番目の画像平面内法線ベクトルの正規化始点座標及び正規化終点座標を表し、 \mathbf{M}_i 及び \mathbf{M}'_i は、i番目の画像平面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、 θ_z は、前記カメラ座標系の第1軸周りの回転角度を表し、 θ_x は、前記カメラ座標系の第1軸以外の第2軸周りの回転角度を表し、 x_i 、 y_i 、 z_i は、i番目の画像平面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、 $\| \quad \|$ は、ノルムを表す。

[請求項10]

請求項1から9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11]

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、前記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複数の画像平面内法線ベクトルを取得し、

前記取得された各画像平面内法線ベクトルの始点及び終点についての画像平面内座標である画像平面内始点座標及び画像平面内終点座標を、前記カメラの内部パラメータに基づいて、正規化座標である正規化始点座標及び正規化終点座標へ変換し、

各画像平面内法線ベクトルについて得られた正規化始点座標及び正規化終点座標と、前記世界座標空間における基準平面に対する法線周りの回転パラメータについて過決定となる評価関数を用いて、前記カメラについての並進ベクトル及び回転行列を算出する、

カメラ校正方法。

[請求項12]

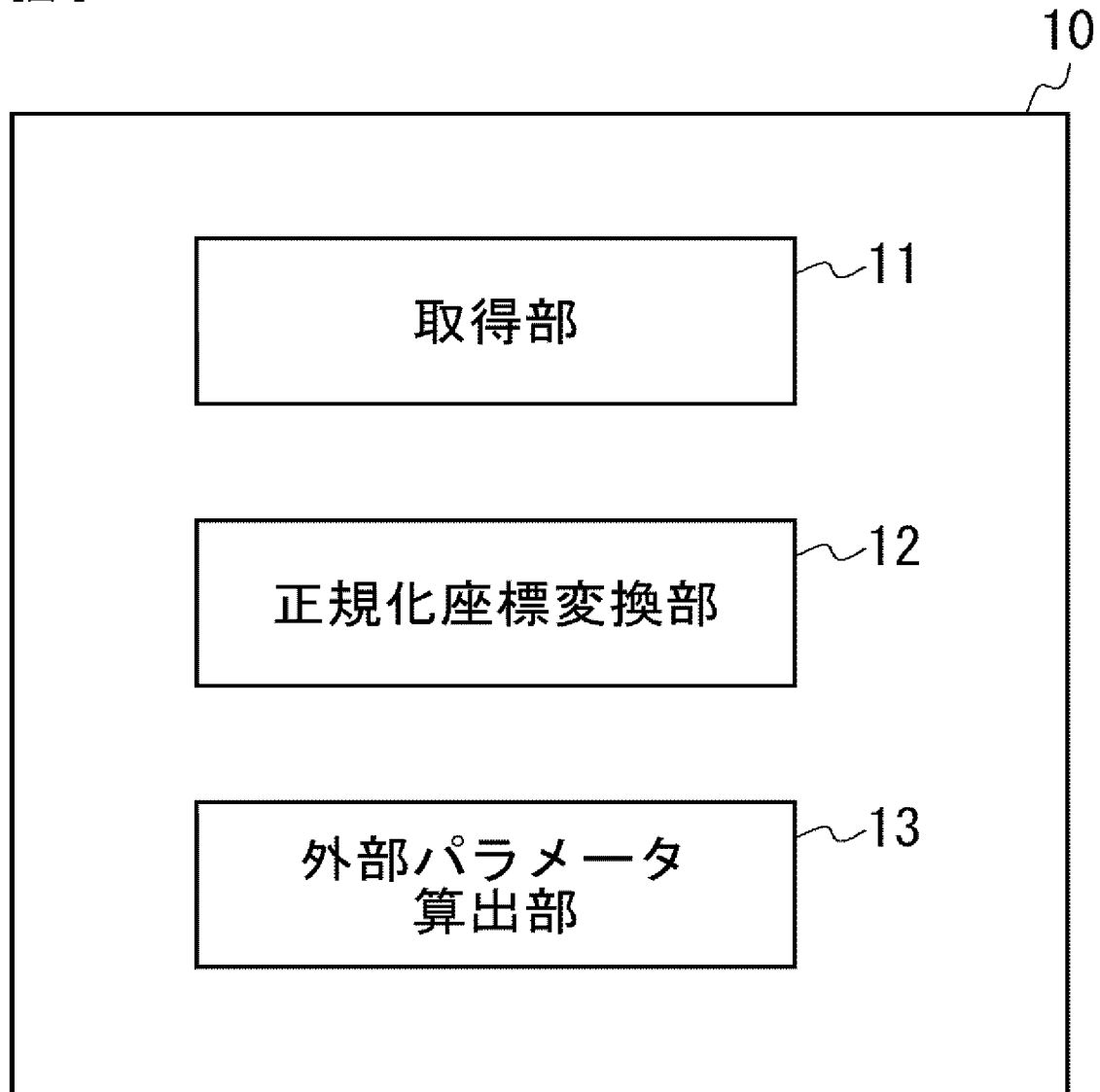
カメラによって世界座標空間が撮影された画像の画像平面において、前記世界座標空間における基準平面に対する複数の世界座標空間内法線ベクトルにそれぞれ対応する複数の画像平面内法線ベクトルを取得し、

前記取得された各画像平面内法線ベクトルの始点及び終点についての画像平面内座標である画像平面内始点座標及び画像平面内終点座標を、前記カメラの内部パラメータに基づいて、正規化座標である正規化始点座標及び正規化終点座標へ変換し、

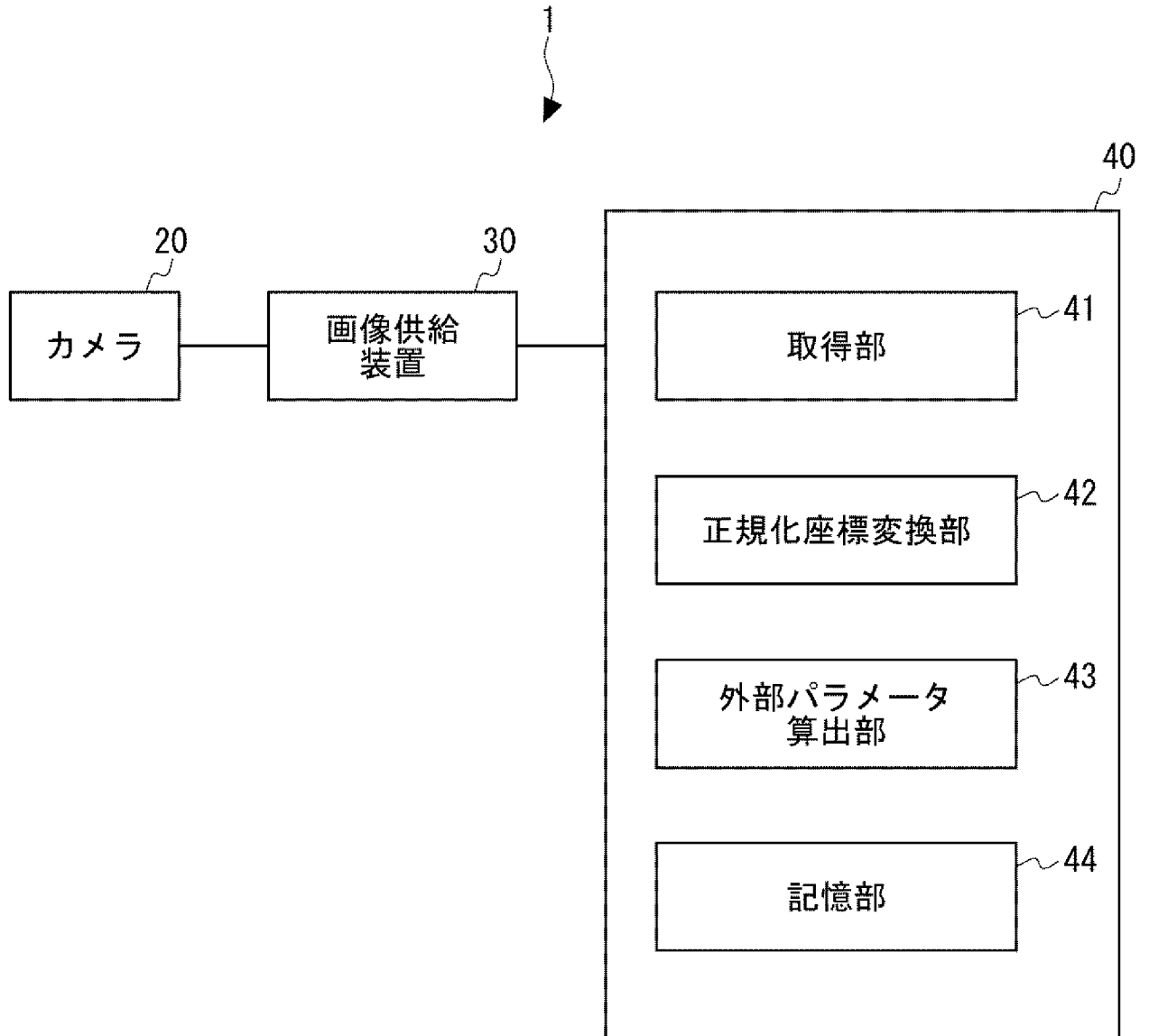
各画像平面内法線ベクトルについて得られた正規化始点座標及び正規化終点座標と、前記世界座標空間における基準平面に対する法線周りの回転パラメータについて過決定となる評価関数を用いて、前記カメラについての並進ベクトル及び回転行列を算出する、

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。

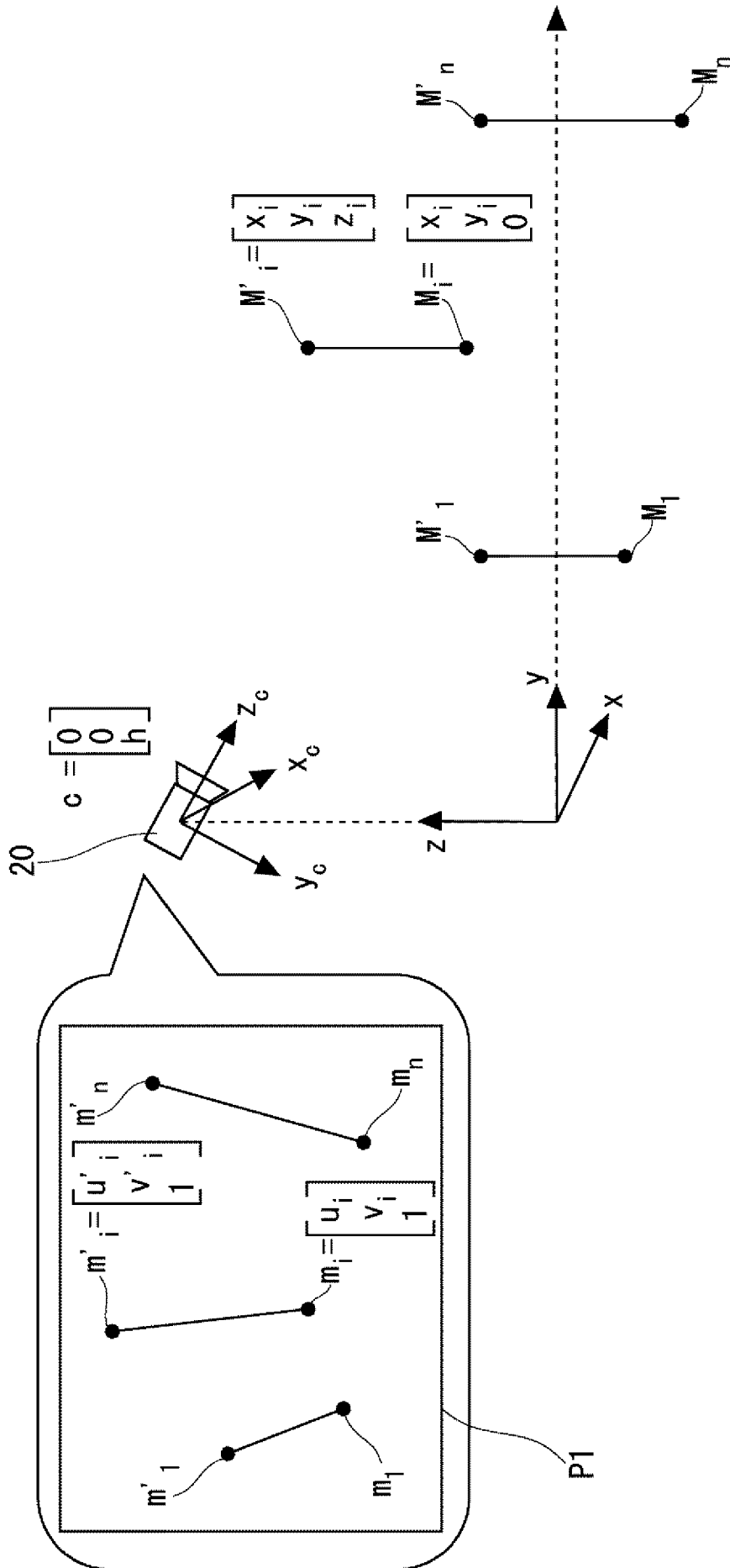
[図1]



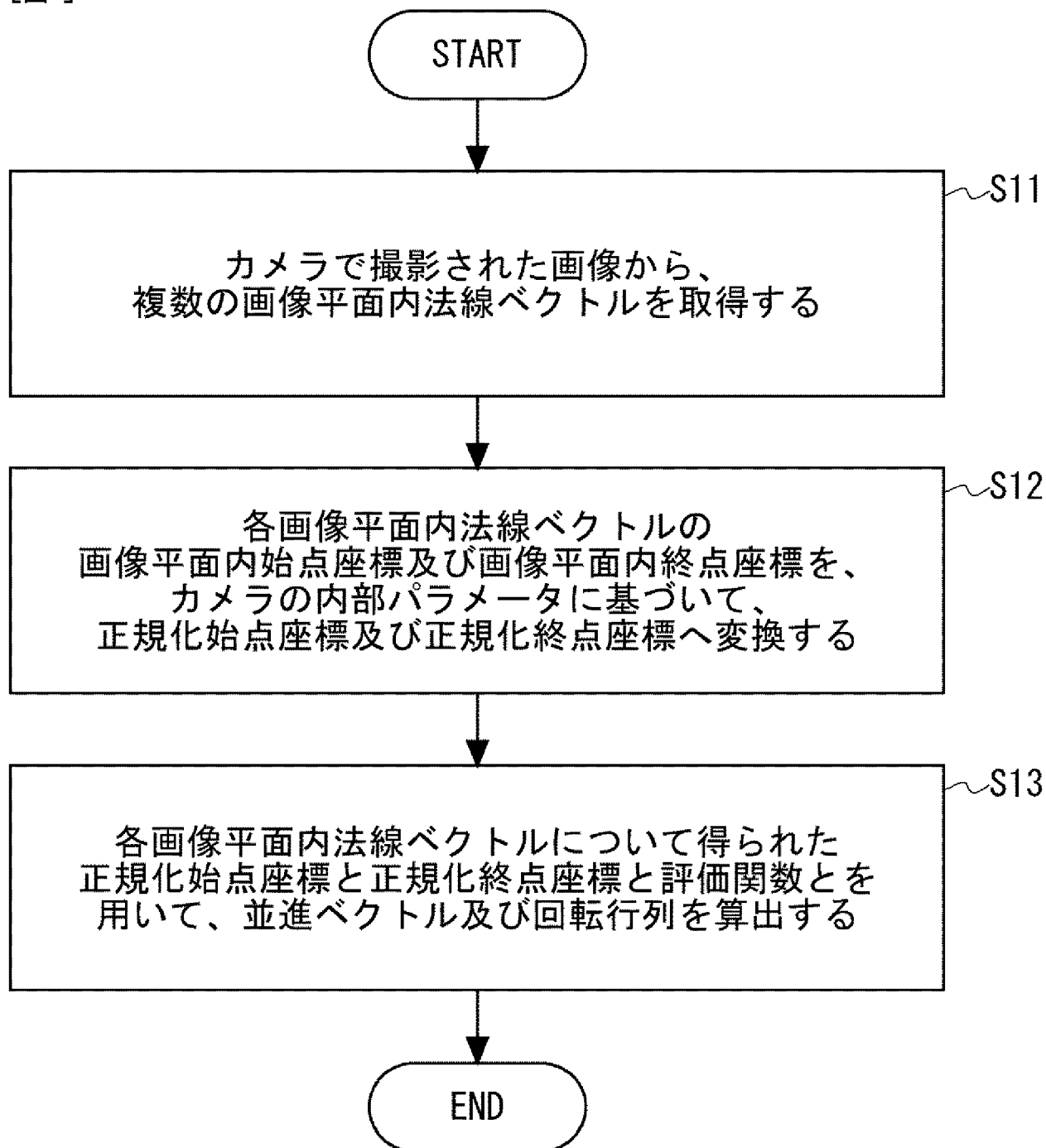
[図2]



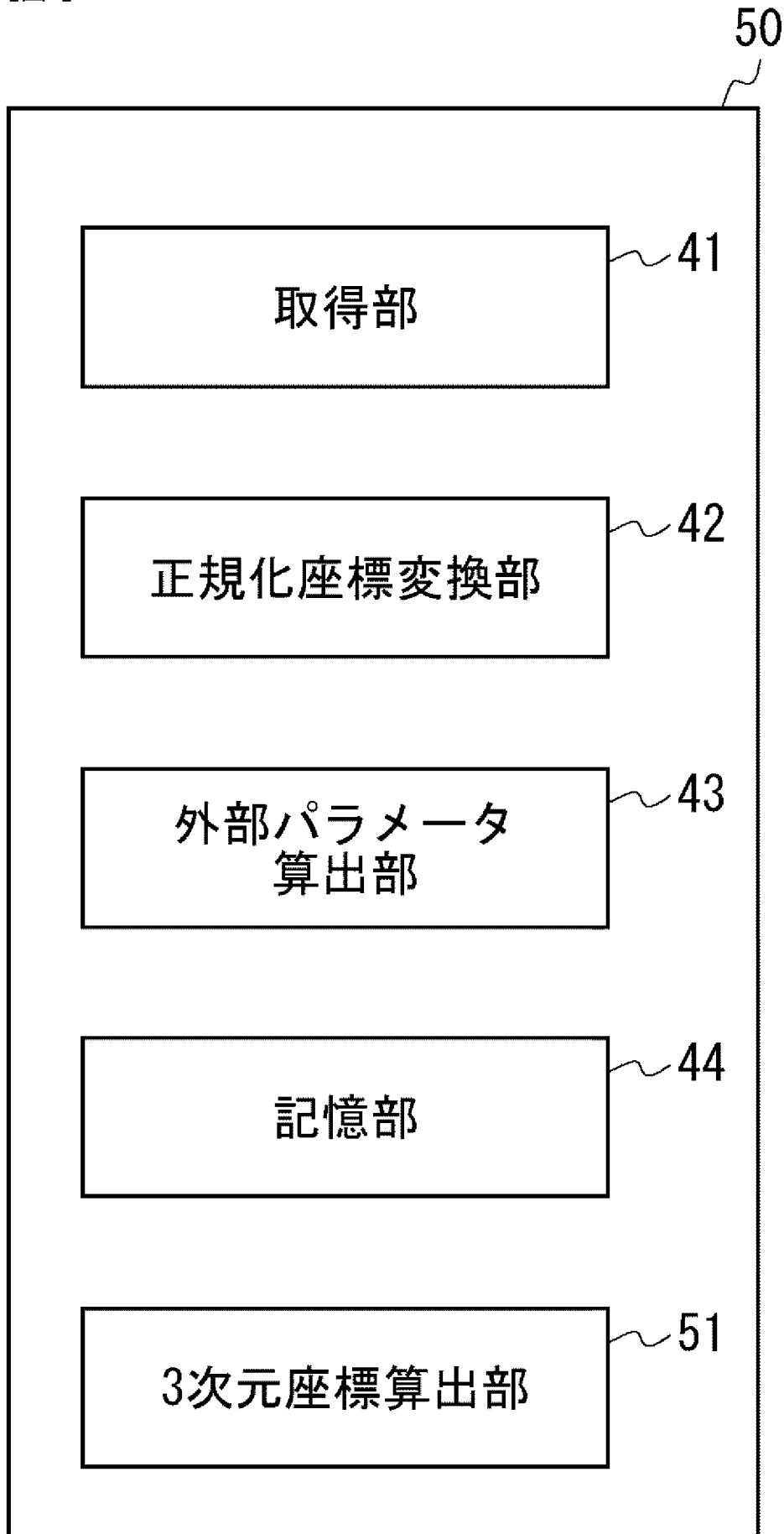
[図3]



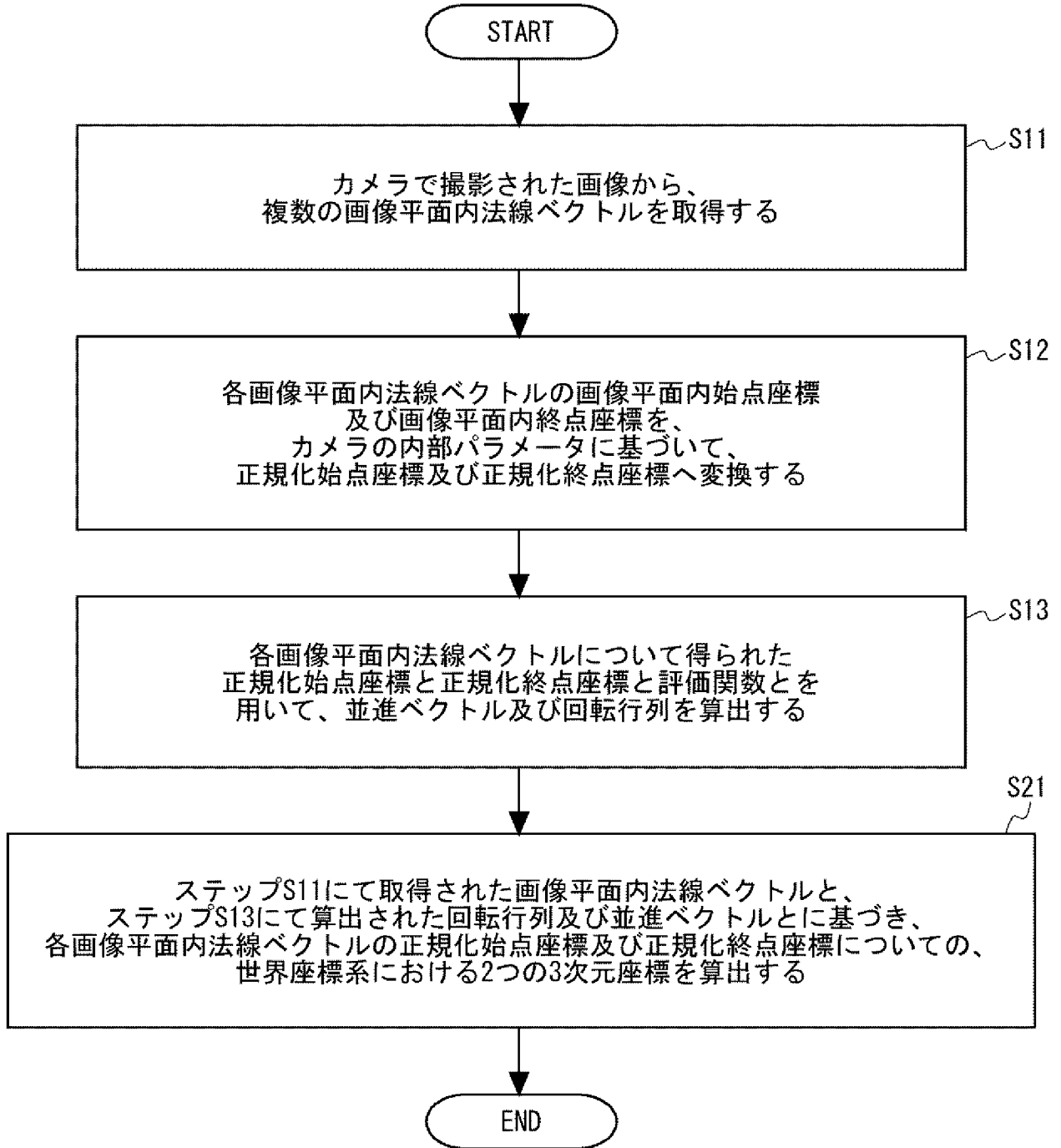
[図4]



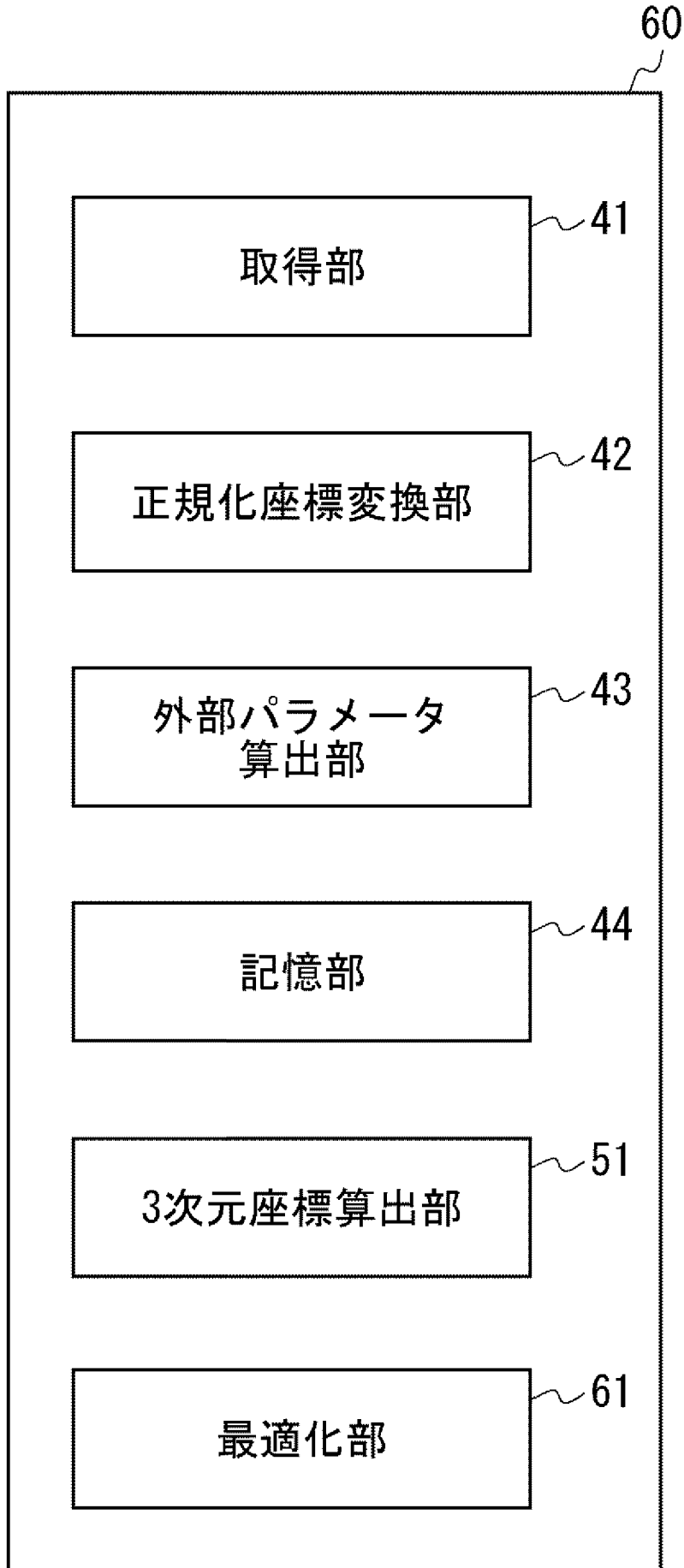
[図5]



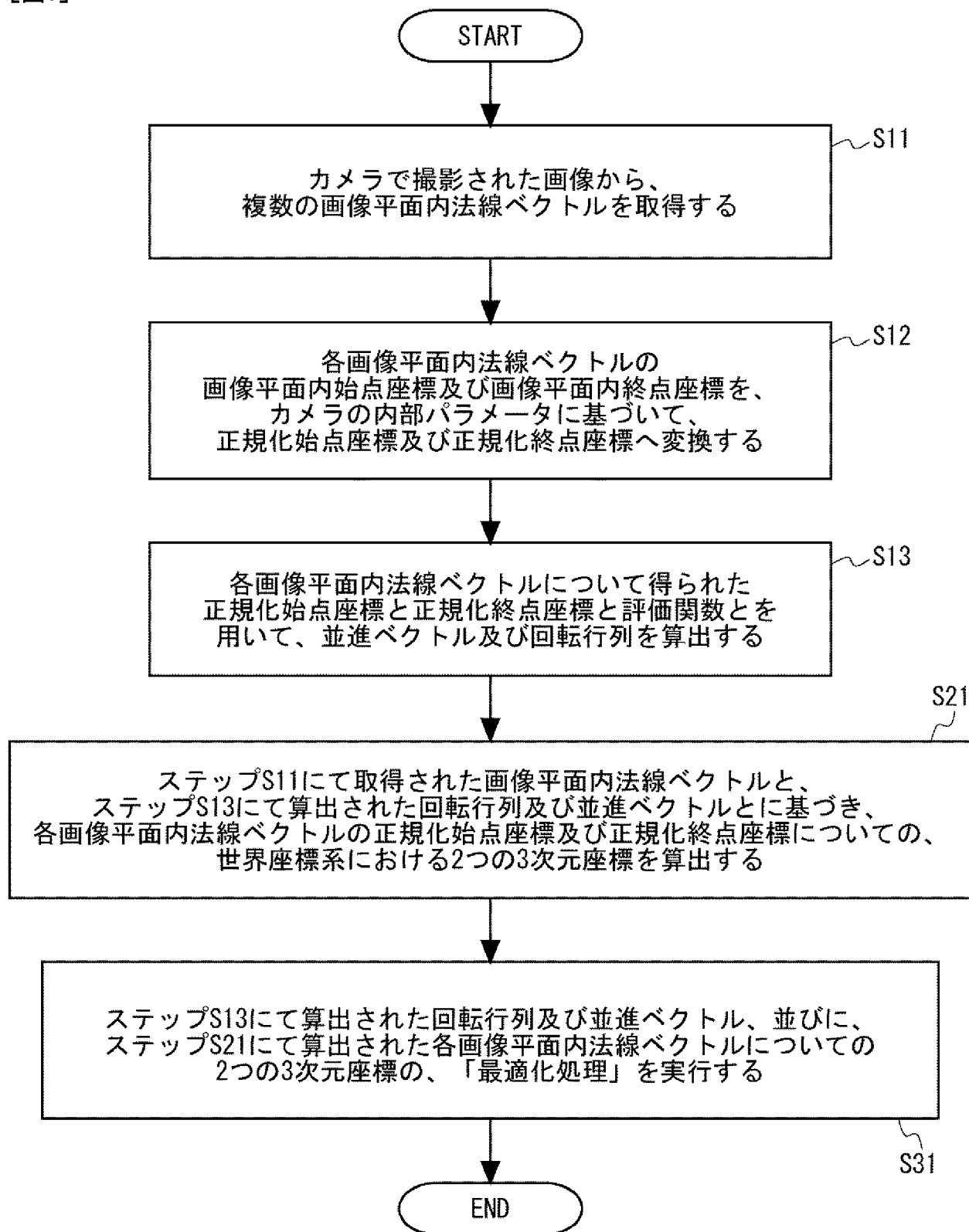
[図6]



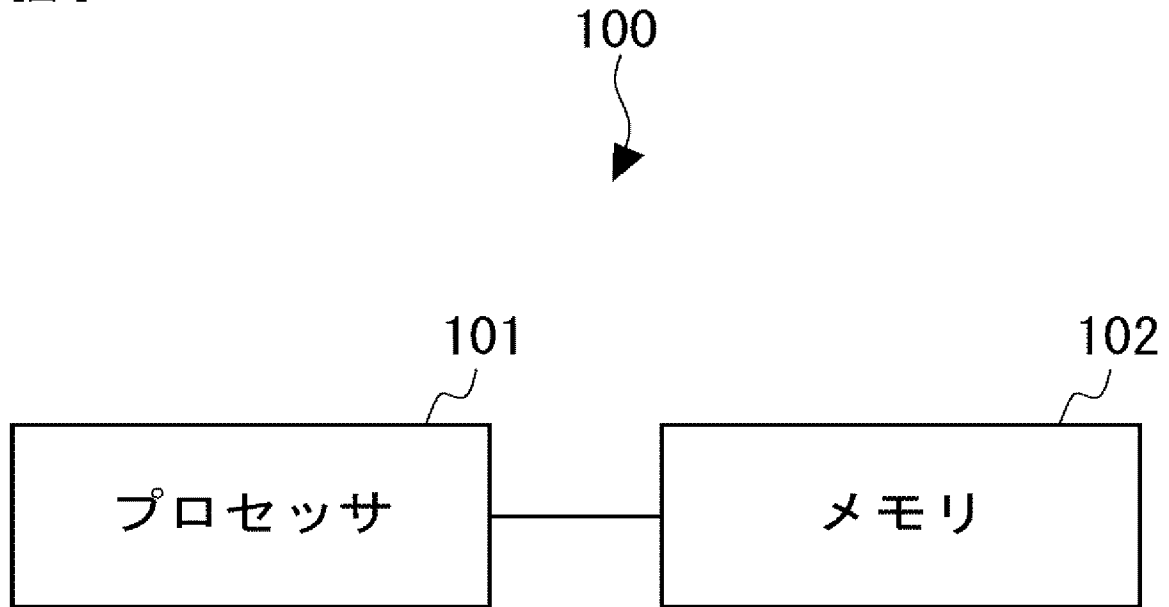
[図7]



[図8]



[図9]



INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No.

PCT/JP2019/011764

A. CLASSIFICATION OF SUBJECT MATTER

Int. Cl. G01B11/00 (2006.01) i, G06T7/70 (2017.01) 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, G06T7/70

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	JP 6011548 B2 (NEC CORP.) 30 September 2016, entire text, all drawings & US 2015/0029345 A1 & WO 2013/111229 A1 & EP 2808645 A1	1-12
A	US 2006/0215031 A1 (KRAHNSTOEVER, Nils Oliver) 28 September 2006, entire document & WO 2006/099172 A1	1-12

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
14.05.2019

Date of mailing of the international search report
28.05.2019

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

Authorized officer

Telephone No.

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, G06T7/70(2017.01)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, G06T7/70

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	JP 6011548 B2 (日本電気株式会社) 2016.09.30, 全文全図 & US 2015/0029345 A1 & WO 2013/111229 A1 & EP 2808645 A1	1-12
A	US 2006/0215031 A1 (KRAHNSTOEVER, Nils Oliver) 2006.09.28, Whole document & WO 2006/099172 A1	1-12

☐ 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

14.05.2019

国際調査報告の発送日

28.05.2019

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)

河内 悠

電話番号 03-3581-1101 内線 3216

2S

3403