

(19) 日本国特許庁 (JP)

(12) 特 許 公 報 (B2)

(11) 特許番号

特許第6080407号
(P6080407)

(45) 発行日 平成29年2月15日 (2017.2.15)

(24) 登録日 平成29年1月27日 (2017.1.27)

(51) Int. Cl.

F I

G O 1 B 11/245 (2006.01)

G O 1 B 11/245 H

G O 3 B 15/00 (2006.01)

G O 3 B 15/00 T

G O 3 B 35/08 (2006.01)

G O 3 B 35/08

G O 3 B 19/07 (2006.01)

G O 3 B 19/07

H O 4 N 13/02 (2006.01)

H O 4 N 13/02

請求項の数 8 (全 23 頁) 最終頁に続く

(21) 出願番号 特願2012-149596 (P2012-149596)
 (22) 出願日 平成24年7月3日 (2012.7.3)
 (65) 公開番号 特開2014-13147 (P2014-13147A)
 (43) 公開日 平成26年1月23日 (2014.1.23)
 審査請求日 平成27年7月2日 (2015.7.2)

(73) 特許権者 000001007
 キヤノン株式会社
 東京都大田区下丸子3丁目30番2号
 (74) 代理人 100082337
 弁理士 近島 一夫
 (74) 代理人 100141508
 弁理士 大田 隆史
 (72) 発明者 鈴木 秀明
 東京都大田区下丸子3丁目30番2号 キ
 ヤノン株式会社内

審査官 眞岩 久恵

最終頁に続く

(54) 【発明の名称】 3次元計測装置及びロボット装置

(57) 【特許請求の範囲】

【請求項1】

ワークを撮像して第1画像を取得する第1カメラと、
 前記第1カメラとは異なる視点でワークを撮像して第2画像を取得する第2カメラと、
 前記第1画像及び前記第2画像のそれぞれからワークの複数のエッジ線を抽出し、前記
 第1画像の複数のエッジ線の中から任意に選択された第1エッジ線の端部と、前記第1エ
 ッジ線に対応するように前記第2画像の複数のエッジ線から抽出された第2エッジ線の端
 部と、の仮の3次元座標に対する視線誤差を演算し、前記第1エッジ線の端点及び第2エ
 ッジ線の端点のそれぞれの視線誤差とワークの3次元形状に基づき、前記第1画像又は前
 記第2画像の複数のエッジ線の中の2本のエッジ線が、同一平面、同一直線、垂直及び平
 行、の各拘束条件の中からいずれか1つ以上を選択して設定された3次元拘束条件とから
 、評価関数を設定し、前記評価関数の値を最小又は最大にする最適化計算を行ってワーク
 の3次元座標を決定する制御部と、を備えた、
 ことを特徴とする3次元計測装置。

【請求項2】

ワークを撮像して第1画像を取得する第1カメラと、
 前記第1カメラとは異なる視点でワークを撮像して第2画像を取得する第2カメラと、
 前記第1画像及び前記第2画像のそれぞれからワークの複数のエッジ線を抽出し、前記
 第1画像の複数のエッジ線の中から任意に選択された第1エッジ線の端部の仮の3次元座
 標に対する視線誤差を演算すると共に、前記第1エッジ線に対応するように前記第2画像

10

20

の複数のエッジ線の中から抽出された第2エッジ線の前記仮の3次元座標に対する視平面誤差を演算し、前記第1エッジ線の端点の視線誤差、第2エッジ線の視平面誤差及びワークの形状に基づき、前記第1画像又は前記第2画像の複数のエッジ線の中の2本のエッジ線が、同一平面、同一直線、垂直及び平行、の各拘束条件の中からいずれか1つ以上を選択して設定された3次元拘束条件から評価関数を設定し、前記評価関数の値を最小又は最大にする最適化計算を行ってワークの3次元座標を決定する制御部と、を備えた、

ことを特徴とする3次元計測装置。

【請求項3】

前記3次元拘束条件として、前記第1画像又は前記第2画像の複数のエッジ線の中の2本のエッジ線が、同一平面、同一直線、垂直及び平行、の各拘束条件の中からいずれか1つ以上を設定する選択手段を備えた、

ことを特徴とする請求項1又は2に記載の3次元計測装置。

【請求項4】

ワークを3次元計測する請求項1から3のいずれか1項に記載の3次元計測装置と、
前記3次元計測装置により計測されたワークの3次元位置に基づいてワークを把持するロボットアームと、を備えた、

ことを特徴とするロボット装置。

【請求項5】

第1カメラでワークを撮像して取得した第1画像からワークの複数のエッジ線を抽出する第1画像エッジ線抽出工程と、

第2カメラでワークを撮像して取得した第2画像からワークの複数のエッジ線を抽出する第2画像エッジ線抽出工程と、

前記第1画像の前記複数のエッジ線の中から任意に選択した第1エッジ線に対応するように前記第2画像の前記複数のエッジ線の中から抽出された第2エッジ線の、前記第1エッジ線の端点に対応する端点を演算する対応点演算工程と、

仮の3次元座標に対する、前記第1エッジ線の端点と、前記第2エッジ線の端点と、のそれぞれの視線誤差を演算する視線誤差演算工程と、

前記第1エッジ線の端点と前記第2エッジ線の端点とのそれぞれに設定された前記視線誤差と、ワークの形状に基づき、前記第1画像又は前記第2画像の複数のエッジ線の中の2本のエッジ線が、同一平面、同一直線、垂直及び平行、の各拘束条件の中からいずれか1つ以上を選択して設定された3次元拘束条件とから評価関数を設定する評価関数設定工程と、

前記評価関数を最小又は最大にする最適化計算を行ってワークの3次元座標を決定する3次元座標計測工程と、を備えた、

ことを特徴とする3次元計測方法。

【請求項6】

第1カメラでワークを撮像して取得した第1画像からワークの複数のエッジ線を抽出する第1画像エッジ線抽出工程と、

第2カメラでワークを撮像して取得した第2画像からワークの複数のエッジ線を抽出する第2画像エッジ線抽出工程と、

前記第1画像の前記複数のエッジ線の中から任意に選択された第1エッジ線の端部の、仮の3次元座標に対する視線誤差と、前記第1エッジ線に対応するように前記第2画像の前記複数のエッジ線の中から抽出された第2エッジ線の、前記仮の3次元座標に対する視平面誤差と、を演算する誤差演算工程と、

前記第1エッジ線の端点の視線誤差、前記第2エッジ線の視平面誤差、及びワークの3次元形状に基づき、前記第1画像又は前記第2画像の複数のエッジ線の中の2本のエッジ線が、同一平面、同一直線、垂直及び平行、の各拘束条件の中からいずれか1つ以上を選択して設定された3次元拘束条件と、から評価関数を設定する評価関数設定工程と、

前記評価関数の値を最小又は最大にする最適化計算を行ってワークの3次元座標を決定する3次元座標計算工程と、を備えた、

ことを特徴とする３次元計測方法。

【請求項 7】

請求項 5 又は 6 に記載の各工程をコンピュータに実行させるための３次元計測プログラム。

【請求項 8】

請求項 7 に記載の３次元計測プログラムを記録したコンピュータ読み取り可能な記録媒体。

【発明の詳細な説明】

【技術分野】

【0001】

10

本発明は、２つ以上の視点からワークの撮像を行い、３次元計測や立体視を行う３次元計測装置及びこれを備えるロボット装置に関する。

【背景技術】

【0002】

従来、非接触にてワークの３次元形状を計測する方法として、複数視点に設置したカメラからワークを撮像し、撮像した複数の画像からワークの３次元形状を計測するステレオ法が知られている。また、ステレオ法においては、少ない情報量でワークの３次元形状を計測するために、撮像した画像上のワークのエッジ線を利用する場合がある。

【0003】

しかしながら、エッジ線を利用して３次元形状を計測するステレオ法は、理想的な条件下においてはワークの正確な３次元形状を得ることができるが、実際にはカメラ校正時の誤差やエッジ線抽出時の誤差が存在する。そのため、計測した３次元形状において、本来繋がっているべきエッジ線がねじれの位置に復元されたり、エッジ線間の角度が正確でなかったりする場合があるという問題があった。

20

【0004】

これに対しては、ワークの複数のエッジ線が同一平面上に存在するという条件（以下、「平面拘束条件」という）を用いて対応点を補正することで、３次元計測の精度を向上させる技術が提案されている（特許文献 1 参照）。

【先行技術文献】

【特許文献】

30

【0005】

【特許文献 1】特開 2003 - 248814 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、特許文献 1 に開示の技術は、同一平面上に存在する点群が満たすべき平面拘束条件を用いて平面パラメータを求めて、画像上の対応点を補正する。そのため、同一平面上にないエッジ線同士の相対角度やエッジ線同士の立体的な位置関係等のような複合的な３次元拘束条件を加えることができなかった。

40

【0007】

ところが、撮像した画像から実際に３次元データを生成する場合には、設計上から、「エッジ線同士が垂直になっている」、「エッジ線同士が水平になっている」、「エッジ線同士が同一直線上にある」等の複合的な３次元拘束条件が予め分かっていることが多い。そのため、これらの複合的な３次元拘束条件を適用して３次元計測の精度を向上させた３次元計測装置が望まれていた。

【0008】

そこで、本発明は、高精度な３次元形状の計測が可能な３次元計測装置及びこれを備えるロボット装置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】

【0009】

50

本発明は、3次元計測装置において、ワークを撮像して第1画像を取得する第1カメラと、前記第1カメラとは異なる視点でワークを撮像して第2画像を取得する第2カメラと、前記第1画像及び前記第2画像のそれぞれからワークの複数のエッジ線を抽出し、前記第1画像の複数のエッジ線の中から任意に選択された第1エッジ線の端部と、前記第1エッジ線に対応するように前記第2画像の複数のエッジ線から抽出された第2エッジ線の端部と、の仮の3次元座標に対する視線誤差を演算し、前記第1エッジ線の端点及び第2エッジ線の端点のそれぞれの視線誤差とワークの3次元形状に基づき、前記第1画像又は前記第2画像の複数のエッジ線の中の2本のエッジ線が、同一平面、同一直線、垂直及び平行、の各拘束条件の中からいずれか1つ以上を選択して設定された3次元拘束条件とから、評価関数を設定し、前記評価関数の値を最小又は最大にする最適化計算を行ってワークの3次元座標を決定する制御部と、を備えたことを特徴とする。

10

【0010】

また、本発明は、3次元計測装置において、ワークを撮像して第1画像を取得する第1カメラと、前記第1カメラとは異なる視点でワークを撮像して第2画像を取得する第2カメラと、前記第1画像及び前記第2画像のそれぞれからワークの複数のエッジ線を抽出し、前記第1画像の複数のエッジ線の中から任意に選択された第1エッジ線の端部の仮の3次元座標に対する視線誤差を演算すると共に、前記第1エッジ線に対応するように前記第2画像の複数のエッジ線の中から抽出された第2エッジ線の前記仮の3次元座標に対する視平面誤差を演算し、前記第1エッジ線の端点の視線誤差、第2エッジ線の視平面誤差及びワークの形状に基づき、前記第1画像又は前記第2画像の複数のエッジ線の中の2本のエッジ線が、同一平面、同一直線、垂直及び平行、の各拘束条件の中からいずれか1つ以上を選択して設定された3次元拘束条件から評価関数を設定し、前記評価関数の値を最小又は最大にする最適化計算を行ってワークの3次元座標を決定する制御部と、を備えたことを特徴とする。

20

【0011】

また、本発明は、3次元計測方法において、第1カメラでワークを撮像して取得した第1画像からワークの複数のエッジ線を抽出する第1画像エッジ線抽出工程と、第2カメラでワークを撮像して取得した第2画像からワークの複数のエッジ線を抽出する第2画像エッジ線抽出工程と、前記第1画像の前記複数のエッジ線の中から任意に選択した第1エッジ線に対応するように前記第2画像の前記複数のエッジ線の中から抽出された第2エッジ線の、前記第1エッジ線の端点に対応する端点を演算する対応点演算工程と、仮の3次元座標に対する、前記第1エッジ線の端点と、前記第2エッジ線の端点と、のそれぞれの視線誤差を演算する視線誤差演算工程と、前記第1エッジ線の端点と前記第2エッジ線の端点とのそれぞれに設定された前記視線誤差と、ワークの形状に基づき、前記第1画像又は前記第2画像の複数のエッジ線の中の2本のエッジ線が、同一平面、同一直線、垂直及び平行、の各拘束条件の中からいずれか1つ以上を選択して設定された3次元拘束条件とから評価関数を設定する評価関数設定工程と、前記評価関数を最小又は最大にする最適化計算を行ってワークの3次元座標を決定する3次元座標計測工程と、を備えたことを特徴とする。

30

【0012】

また、本発明は、3次元計測方法において、第1カメラでワークを撮像して取得した第1画像からワークの複数のエッジ線を抽出する第1画像エッジ線抽出工程と、第2カメラでワークを撮像して取得した第2画像からワークの複数のエッジ線を抽出する第2画像エッジ線抽出工程と、前記第1画像の前記複数のエッジ線の中から任意に選択された第1エッジ線の端部の、仮の3次元座標に対する視線誤差と、前記第1エッジ線に対応するように前記第2画像の前記複数のエッジ線の中から抽出された第2エッジ線の、前記仮の3次元座標に対する視平面誤差と、を演算する誤差演算工程と、前記第1エッジ線の端点の視線誤差、前記第2エッジ線の視平面誤差、及びワークの3次元形状に基づき、前記第1画像又は前記第2画像の複数のエッジ線の中の2本のエッジ線が、同一平面、同一直線、垂直及び平行、の各拘束条件の中からいずれか1つ以上を選択して設定された3次元拘束条

40

50

件と、から評価関数を設定する評価関数設定工程と、前記評価関数の値を最小又は最大にする最適化計算を行ってワークの３次元座標を決定する３次元座標計算工程と、備えたことを特徴とする。

【発明の効果】

【００１３】

本発明によれば、同時に満たす複合的な３次元拘束条件を設定した評価関数を最適化計算することで、高精度な３次元形状の計測を行うことができる。

【図面の簡単な説明】

【００１４】

10

【図１】本発明の実施形態に係るロボット装置の概略構成を示す斜視図である。

【図２】本実施形態に係るロボット装置の制御装置を示すブロック図である。

【図３】第１実施形態に係るカメラ制御部の構成を示すブロック図である。

【図４】第１実施形態に係る３次元座標の計測を示すフローチャートである。

【図５】第１実施形態に係る基準カメラ、参照カメラ及びワークを示す模式図である。

【図６】エピソード線を用いた対応点の求め方を説明するための図である。

【図７】第１エッジ線の第１端点及び第２エッジ線の第２端点の視線誤差を説明するための模式図である。

【図８】第１実施形態に係るエッジ線間の対応付けを行った際のデータ構造を示す図である。

20

【図９】第１実施形態に係るエッジ線間の３次元拘束条件を説明するための模式図である。

【図１０】第２実施形態に係るカメラ制御部の構成を示すブロック図である。

【図１１】第２実施形態に係る３次元座標の計測を示すフローチャートである。

【図１２】第２実施形態に係る視線誤差と視平面誤差とを説明するための模式図である。

【発明を実施するための形態】

【００１５】

< 第１実施形態 >

以下、本発明の第１実施形態に係るロボット装置１について、図１から図９を参照しながら説明する。まず、ロボット装置１の概略構成について、図１から図３を参照しながら説明する。図１は、本発明の実施形態に係るロボット装置１を示す斜視図である。図２は、本実施形態に係るロボット装置１の制御装置４の構成を示すブロック図である。図３は、第１実施形態に係るカメラ制御部５の構成を示すブロック図である。

30

【００１６】

図１に示すように、第１実施形態に係るロボット装置１は、ワークの組立を行うロボット２と、ロボット２によるワークの組立が行われる架台３と、ロボット２を制御する制御装置４と、を備えている。

【００１７】

ロボット２は、６軸多関節の汎用ロボットであり、ロボットアーム２０と、ロボットアームの先端部に取り付けられたハンド２１と、第１カメラとしての基準カメラ２２と、第２カメラとしての参照カメラ２３と、を備えている。なお、本実施形態においては、基準カメラ２２と参照カメラ２３の２台のカメラを用いたが、例えば、ステレオカメラのような複眼カメラを用いてもよい。

40

【００１８】

ロボットアーム２０は、各関節を各関節軸まわりにそれぞれ回転駆動する６つのアクチュエータ（図示せず）を備えており、６つのアクチュエータのそれぞれを選択的に駆動することで先端部に取り付けられたハンド２１を任意の３次元位置に移動させる。ハンド２１は、ワーク等を把持する把持部２１ａと、把持部２１ａを駆動する不図示のアクチュエータと、を備えており、ロボットアーム２０の駆動により移動し、移動した位置でアクチュエータを駆動することでワーク等を把持する。なお、ハンド２１には、不図示の力覚セ

50

ンサが設けられており、ワークを把持する際には、力覚センサによりワークを把持する把持力が調整される。また、ハンド 21 は、ロボットアーム 20 の先端に着脱自在に取り付けられており、作業するワークの形状等により交換可能になっている。

【0019】

基準カメラ 22 は、ロボットアーム 20 の先端に取り付けられており、ワークを撮像してワークの第 1 画像を取得する。参照カメラ 23 は、ロボットアーム 20 の先端で基準カメラ 22 に隣接して取り付けられており、基準カメラ 22 と異なる視点でワークを撮像してワークの第 2 画像を取得する。

【0020】

架台 3 は、矩形箱状に形成されており、上面にワークが載置される平面状の載置部 30 が設けられている。載置部 30 の略中央部には、ワークの組立に用いられる治具 31 が設けられており、載置部 30 の隅部には、ロボットアーム 20 の基端部を固定支持する支持部 32 と、部品供給機 33 と、工具置き台 34 と、が設けられている。架台 3 の下部には、架台 3 を移動させるための 4 つのキャスター 35 ・ ・ ・ と、架台 3 を床面に固定させるための 4 つの固定金具 36 ・ ・ ・ と、が設けられており、任意の位置に移動した後、固定可能となっている。

【0021】

図 2 に示すように、制御装置 4 は、演算装置 40 と、記憶装置 41 と、を有するコンピュータ本体に、ロボットアーム 20、ハンド 21、基準カメラ 22 及び参照カメラ 23 がバスを介して接続されて構成されている。また、コンピュータ本体には、入力装置 42、ティーチングペンダント 43、ディスプレイ 44、スピーカ 45、記録メディア読取装置 46 及び通信装置 47 などともバスを介して接続されている。なお、図 2 においては、これらを接続するためのインターフェイスは不図示としている。

【0022】

演算装置 40 は、CPU 40a と、画像処理装置 40b と、音声処理装置 40c と、を備えている。CPU 40a は、カメラ制御部 5 と、ロボット制御部 6 と、を備えている。カメラ制御部 5 は、記憶装置 41 に記憶された各種プログラムや入力装置 42 から入力される設定等に従って、ワークの 3 次元位置を計測する。

【0023】

図 3 に示すように、カメラ制御部 5 は、第 1 画像エッジ線抽出部 51 と、第 2 画像エッジ線抽出部 52 と、対応点演算部 53 と、視線誤差演算部 54 と、評価関数設定部 55 と、3 次元座標計測部 56 と、を備えている。

【0024】

第 1 画像エッジ線抽出部 51 は、基準カメラ 22 でワークを撮像して取得した第 1 画像から、ワークの複数のエッジ線を抽出する。第 2 画像エッジ線抽出部 52 は、参照カメラ 23 でワークを撮像して取得した第 2 画像から、ワークの複数のエッジ線を抽出する。対応点演算部 53 は、第 1 画像の複数のエッジ線の中から任意に選択した第 1 エッジ線に対応する第 2 エッジ線を第 2 画像の複数のエッジ線の中から抽出し、抽出した第 2 エッジ線の第 1 エッジ線の端点に対応する端点を演算する。視線誤差演算部 54 は、仮の 3 次元座標を設定し、仮の 3 次元座標に対する、第 1 エッジ線の端点と、第 2 エッジ線の端点と、のそれぞれの視線誤差を演算する。評価関数設定部 55 は、第 1 エッジ線の端点と第 2 エッジ線の端点とのそれぞれに設定された視線誤差と、ワークの形状に基づいて設定された 3 次元拘束条件と、から視線誤差と 3 次元拘束条件とを含む評価関数を設定する。3 次元座標計測部 56 は、評価関数が最小ないし最大となるように最適化計算を行ってワークの 3 次元座標を計測する。なお、カメラ制御部 5 によるワークの 3 次元位置の計測については、後に詳しく説明する。

【0025】

ロボット制御部 6 は、カメラ制御部 5 により計測されたワークの 3 次元位置及び記憶装置 41 に記憶された各種プログラムや入力装置 42 から入力される設定等に基づいて、ロボットアーム 20 やハンド 21 を制御する。なお、ロボット制御部 6 によるロボットア

10

20

30

40

50

ム 2 0 やハンド 2 1 の制御については、その説明を省略する。

【 0 0 2 6 】

画像処理装置 4 0 b は、C P U 4 0 a からの描画指示に応じてディスプレイ 4 4 を制御して、画面上に所定の画像を表示させる。音声処理装置 4 0 c は C P U 4 0 a からの発音指示に応じた音声信号生成してスピーカ 4 5 に出力する。

【 0 0 2 7 】

記憶装置 4 1 は、バスを介して C P U 4 0 a に接続されており、各種プログラムやデータ等が格納された R O M 4 1 a と、C P U 4 0 a の作業領域として確保された R A M 4 1 b と、を備えている。本実施形態においては、R O M 4 1 a には、ロボットアーム 2 0 やハンド 2 1 の駆動プログラムに加え、ワークを 3 次元計測するための各種プログラム等が格納されている。例えば、後述する第 1 画像エッジ線抽出工程、第 2 画像エッジ線抽出工程、対応点演算工程、視線誤差演算工程、評価関数設定工程及び 3 次元座標計測工程を実行させるための 3 次元計測プログラム等が格納されている。また、R O M 4 1 a は、作業者により、3 次元拘束条件や基準カメラ 2 2 及び参照カメラ 2 3 のカメラパラメータ等のデータが入力装置 4 2 から入力された際には、これらを格納する。

【 0 0 2 8 】

入力装置 4 2 は、キーボード 4 2 a と、マウス 4 2 b と、から構成されており、ワークの 3 次元位置の計測に必要な情報、或いはその他の指示の入力を可能としている。記録メディア読取装置 4 6 は、例えば、3 次元計測プログラム等を記録したコンピュータ読み取り可能な記録媒体 4 8 を読み込み、R O M 4 1 a に格納させるため等に用いられる。通信装置 4 7 は、例えば、上述したような記録媒体 4 8 を使用せずに、通信装置 4 7 を介してインターネット等から配信される 3 次元計測プログラム等をダウンロードする際に用いられる。

【 0 0 2 9 】

次に、上述のように構成されたロボット装置 1 のカメラ制御部 5 によるワークの 3 次元座標の計測方法について、図 4 に示すフローチャートに沿って、図 5 から図 9 を参照しながら説明する。図 4 は、第 1 実施形態に係る 3 次元座標の計測を示すフローチャートである。図 5 は、第 1 実施形態に係る基準カメラ 2 2、参照カメラ 2 3 及びワークを示す模式図である。図 6 は、エピポーラ線を用いた対応点の求め方を説明するための図である。図 7 は、第 1 エッジ線の第 1 端点及び第 2 エッジ線の第 2 端点の視線誤差を説明するための模式図である。図 8 は、第 1 実施形態に係るエッジ線間の対応付けを行った際のデータ構造を示す図である。図 9 は、第 1 実施形態に係るエッジ線間の 3 次元拘束条件を説明するための模式図である。

【 0 0 3 0 】

まず、図 5 に示すように、異なる視点から共通視野を持つように配置された、基準カメラ 2 2 及び参照カメラ 2 3 のそれぞれのレンズ主点 O_L 、 O_R を原点とし、各々のカメラ座標系の Z 軸が画像面と直交するように設定する。以下、基準カメラ 2 2 を代表する座標系を基準カメラ座標系 C_L 、参照カメラ 2 3 を代表する座標系を参照カメラ座標系 C_R で表し、基準カメラ 2 2 の画像面を基準画像面 2 2 a、参照カメラ 2 3 の画像面を参照画像面 2 3 a と表す。

【 0 0 3 1 】

次に、基準カメラ 2 2 の内部パラメータと、参照カメラ 2 3 の内部パラメータと、カメラの外部パラメータと、を求め、R O M 4 1 a に記憶させておく。内部パラメータとは、カメラ座標系で表された任意の 3 次元座標を画像面上の点へ投影する計算の際に必要なパラメータであり、公知のカメラキャリブレーション技術によって求めることができる。本実施形態においては、内部パラメータを算出する詳細な説明は省略し、下記の表現を用いるものとする。

【 0 0 3 2 】

f をレンズの焦点距離、 c_u を画像面とカメラ光軸の交点の列座標、 c_v を画像面とカメラ光軸の交点の行座標、 s_x を画像センサの 1 画素あたりの幅、 s_y を画像センサの 1

10

20

30

40

50

画素あたりの高さ、とする。なお、列座標 c_u 、行座標 c_v は、画像ピクセルに対し、左から c_u 列目、上から c_v 行目が、カメラ光軸と画像面の交点であることを意味する。また、 c_u 、 c_v は整数である必要はなく、サブピクセルの精度で求まっていてもよい。また、焦点距離 f 、1 画素あたりの幅 s_x 及び 1 画素あたりの高さ s_y は、一般的な長さの単位（例えば、ミリメートルやメートル等）で表現される。

【0033】

すると、基準カメラ 22 の内部パラメータは、 $(f_L, c_{uL}, c_{vL}, s_{xL}, s_{yL})$ と表すことができ、参照カメラ 23 の内部パラメータは、 $(f_R, c_{uR}, c_{vR}, s_{xR}, s_{yR})$ と表すことができる。なお、添え字 L は、基準カメラ 22 の内部パラメータを示し、添え字 R は、参照カメラ 23 の内部パラメータを示している。

10

【0034】

また、画像座標 (u, v) の点は、内部パラメータを用いて下記のようにカメラ座標系の座標 $P = {}^T(x, y, z)$ に変換することができる。

【0035】

【数 1】

$$P = \begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} s_x(u - c_u) \\ s_y(v - c_v) \\ f \end{pmatrix}$$

20

【0036】

外部パラメータは、基準カメラ 22 と参照カメラ 23 の 6 自由度の相対姿勢を表すパラメータであり、公知のキャリブレーション技術によって求めることができる。本実施形態においては、基準カメラ 22 と参照カメラ 23 の間の外部パラメータを算出する詳細な説明は省略し、回転行列 R 及び並進ベクトル t で表す。

【0037】

ここで、回転行列 R と並進ベクトル t は、基準カメラ座標系 C_L から参照カメラ座標系 C_R への座標変換を表しており、参照カメラ座標系 C_R で記述された任意の 3 次元座標 (X_R) は、基準カメラ座標系 C_L では外部パラメータを用いて下のように表される。

30

【0038】

【数 2】

$$X^{(L)} = R \cdot X^{(R)} + t$$

【0039】

なお、上記においては、基準カメラ座標系 C_L 及び参照カメラ座標系 C_R で表現された座標値であることを明確にするために、 (L) 及び (R) の添え字を用いた。以下の説明においては、基準カメラ座標系を全体の基準座標系とし、特に座標系を表す添え字の無い場合は基準カメラ座標系で記述されているものとする。このとき $O_L = {}^T(0, 0, 0)$ 、 $O_R = t$ である。また、カメラの内部パラメータ、外部パラメータに関しては行列形式での表現など、様々な表現方法が存在するが、本実施形態においてはどの形式の表現を用いるかという点は本質的ではない。また、本実施形態においては、レンズ歪については考慮していないが、レンズ歪について考慮したパラメータを用いてもよい。

40

【0040】

次に、評価関数の準備を行う。本実施形態においては、画像点に対する視線からの誤差と 3 次元拘束条件とからの誤差を評価するための評価関数が重要な役割を担う。本実施形態においては、評価関数を F で表す。本実施形態に係る評価関数 F は、視線誤差項部分と

50

3次元拘束条件項部分の和の形で表される。評価関数 F の視線誤差項部分を $F_{sight(N)}$ 、評価関数 F の3次元拘束条件項部分を $F_{const(M)}$ と表す。すなわち、評価関数 F は、

【0041】

【数3】

$$F = F_{sight(N)} + F_{const(M)}$$

となる。なお、図4に示す処理フロー開始時点の初期値は、 $F_{sight(N)} = 0$ 、かつ、 $F_{const(M)} = 0$ であり、ループ処理により項を追加していく。添え字 N は N 番目までのエッジ対応付けに関する視線誤差項であることを表し、添え字 M は M 個の拘束条件を設定した時点での拘束条件項であることを表している。

【0042】

次に、基準カメラ22でワーク10を撮像して第1画像としての基準画像面22aを取得し、取得した基準画像面22aに対して、ワーク10の複数のエッジ線を抽出するエッジ線抽出処理を行う（ステップS101、第1画像エッジ線抽出工程）。具体的には、まず、基準画像面22aに対して、ソーベルフィルタやキャニーフィルタ等のエッジ抽出フィルタを用い、輝度変化が最大となる点を、エッジ点群として抽出する。次に、抽出したエッジ点群に対して、直線近似の処理を行うとともに線分に分割し、それぞれの端点の画像座標（画素の位置）を求める。画像座標に関しては、画素単位の値としても構わないが、高精度の計測を行うためにはサブピクセル精度の処理を用いることが望ましい。本実施形態においては、エッジ点群を線分に近似したものを、エッジ線と呼ぶ。同様に、参照カメラ23でワーク10を撮像した第2画像としての参照画像面23aに対して、ワーク10の複数のエッジ線を抽出するエッジ線抽出処理を行う（ステップS101、第2画像エッジ線抽出工程）。

【0043】

次に、基準画像面22aにおいて抽出された複数のエッジ線が、参照画像面23aでどこに撮影されているかを特定する対応付け処理を行い、ROM41aに記憶させる。つまり、基準画像面22aから抽出された複数のエッジ線と、参照画像面23aから抽出された複数のエッジ線と、の対応付けを行い、これを記憶しておく。対応付け処理は、対応付け終了と判定されるまで続けて行われる（ステップS102～S106）。なお、対応付け自体は、ユーザがUI上で画像を見ながら同一と思われるエッジ線を指定してもよく、カメラ制御部5が画像相関を用いて類似の画像パターンを検出することで選択する公知の手法を用いてもよい。具体的には、基準画像面22aから抽出した複数のエッジ線から1つのエッジ線（第1エッジ線）を選択し（ステップS103）、参照画像面23a内でそれと対応するエッジ線（第2エッジ線）を選択する（ステップS104）。関連づけた第1エッジ線と第2エッジ線とに対して、後述の処理を行うことにより、3次元空間での1本のエッジ線が求まる。

【0044】

次に、上述により対応付けられたエッジ線（例えば、第1エッジ線と第2エッジ線）は、照明条件等の制約により、一般には端点が同一の点とは限らない。そのため、対応付けられたエッジ線に対してエピポラ拘束を用いてエッジ線上の点同士の対応を求める（ステップS105、対応点演算工程）。

【0045】

ステップS101において、例えば、選択した第1エッジ線の端点の画像座標が分かっているので、第1エッジ線の端点に対する参照画像面23a上のエピポラ線と参照画像面23a上の第2エッジ線との交点を求めることで、対応点の座標を求めることができる。例えば、図6に示すように、エピポラ拘束を用いて基準画像面22aと参照画像面23aで共通に撮影されている部分を判定し、それぞれの端点を求める。なお、図6におい

10

20

30

40

50

ては、基準画像面 2 2 aと参照画像面 2 3 aとの間で、同種の破線で表されたエピポーラ線がそれぞれ対応している。この対応点計算処理を行うことにより、 i 番目のエッジ線の対応に対して、各々の画像上での画像点 $P_{L i 1}$ 、 $P_{L i 2}$ 、 $P_{R i 1}$ 、 $P_{R i 2}$ の画像座標が求まる。

【0046】

次に、ステップ S 1 0 5 で求めた対応点の画像座標を用いて、未知の 3 次元座標 $X_{i j}$ に対する視線誤差項を求める（ステップ S 1 0 6、視線誤差演算工程）。ここで、添え字 i は、 i 番目のエッジ線対応を表し、添え字 j は、 $j = 1, 2$ がそれぞれエッジ線の両端点に対応している。視線誤差項としては、レンズ主点 O_L 、 O_R と画像点 $P_{L i j}$ 、 $P_{R i j}$ とを結ぶ基準画像視線 2 4、参照画像視線 2 5 を考えた際に、基準画像視線 2 4 及び参照画像視線 2 5 から 3 次元座標 $X_{i j}$ までの距離 $d_{L i j}$ 、 $d_{R i j}$ に応じて値が大きくなるように定める。ここで、「基準画像視線 2 4、参照画像視線 2 5 から 3 次元座標 $X_{i j}$ までの距離 $d_{L i j}$ 、 $d_{R i j}$ 」とは、図 7 に示すように、3 次元座標 $X_{i j}$ から基準画像視線 2 4、参照画像視線 2 5 のそれぞれに降ろした垂線の長さである。本実施形態においては、基準画像視線 2 4、参照画像視線 2 5 から 3 次元座標 $X_{i j}$ までの距離 $d_{L i j}$ 、 $d_{R i j}$ の自乗和を、視線誤差項として用いる。

【0047】

以下、視線誤差項の計算について、数式を用いて説明する。まず、画像点 $P_{L i j}$ の画像座標を $(u_{L i j}, v_{L i j})$ 、画像点 $P_{R i j}$ の画像座標を $(u_{R i j}, v_{R i j})$ と表すと、それぞれのカメラ座標系における画像点 $P_{L i j}$ 、 $P_{R i j}$ の座標値は、次の式で表すことができる。

【0048】

【数 4】

左画像点 P_{Lij} について：

$$\mathbf{P}_{Lij} = \begin{pmatrix} x_{Lij} \\ y_{Lij} \\ z_{Lij} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} s_{xL}(u_{Lij} - c_{uL}) \\ s_{yL}(v_{Lij} - c_{vL}) \\ f_L \end{pmatrix}$$

右画像点 P_{Rij} について：

$${}^{(R)}\mathbf{P}_{Rij} = \begin{pmatrix} x'_{Rij} \\ y'_{Rij} \\ z'_{Rij} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} s_{xR}(u_{Rij} - c_{uR}) \\ s_{yR}(v_{Rij} - c_{vR}) \\ f_R \end{pmatrix}$$

$$\mathbf{P}_{Rij} = \mathbf{R} \times {}^{(R)}\mathbf{P}_{Rij} + \mathbf{t}$$

【0049】

次に、それぞれのカメラ座標系原点 O_L 、 O_R から画像点 $P_{L i j}$ 、 $P_{R i j}$ に向かう単位視線ベクトルを求める。単位視線ベクトルを $e_{L i j}$ 、 $e_{R i j}$ で表すと、以下のよう表せる。

【0050】

10

20

30

40

【数 5】

$$\mathbf{e}_{Lij} = \frac{\mathbf{P}_{Lij} - \mathbf{O}_L}{|\mathbf{P}_{Lij} - \mathbf{O}_L|} \quad (i=1,2,,N, \quad j=1,2)$$

$$\mathbf{e}_{Rij} = \frac{\mathbf{P}_{Rij} - \mathbf{O}_R}{|\mathbf{P}_{Rij} - \mathbf{O}_R|} \quad (i=1,2,,N, \quad j=1,2)$$

10

【0051】

この時点で基準カメラ座標系における単位視線ベクトル \mathbf{e}_{Lij} 及び単位視線ベクトル \mathbf{e}_{Rij} は、画像から抽出した対応点とカメラの内部パラメータ及び外部パラメータを用いて一意に求めることが可能な定数である。

【0052】

ここで、未知の3次元座標 $\mathbf{X}_{ij} = (x_{ij}, y_{ij}, z_{ij})$ を導入し、 \mathbf{X}_{ij} と視線との距離を求める。求める距離 d_{Lij} 及び距離 d_{Rij} はベクトルの外積を用いて表すと以下ようになる。

【0053】

【数 6】

20

$$d_{Lij} = |\mathbf{e}_{Lij} \times (\mathbf{X}_{ij} - \mathbf{O}_L)| \quad (i=1,2,,N, \quad j=1,2)$$

$$d_{Rij} = |\mathbf{e}_{Rij} \times (\mathbf{X}_{ij} - \mathbf{O}_R)| \quad (i=1,2,,N, \quad j=1,2)$$

【0054】

ステップ S106 の最後に、未知の3次元座標 \mathbf{X}_{ij} と視線との距離 d_{Lij} 、 d_{Rij} に応じた視線誤差項を評価関数に加える。本実施形態においては、評価関数 F に距離 d_{Lij} 、 d_{Rij} の自乗和を加える。 i 番目の視線誤差項を追加した時点における評価関数 F の視線誤差項部分を $F_{sight(i)}$ と書くことにすると、

30

【0055】

【数 7】

$$F_{sight(i)} = F_{sight(i-1)} + \sum_{j=1}^2 (d_{Lij}^2 + d_{Rij}^2)$$

となる。

40

【0056】

視線誤差項を加えた後は、ステップ S102 に戻り、追加の対応付けを終了するか否かの判断を行い、終了と判定されるまでステップ S103 ~ S106 の処理を繰り返し、処理を繰り返すたびに視線誤差項が追加される。その結果、 N 回の繰り返しを行った場合の評価関数の視線誤差項部分 $F_{sight(N)}$ は下記ようになる。

【0057】

【数 8】

$$F_{sight(N)} = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^2 (d_{Lij}^2 + d_{Rij}^2)$$

【0058】

ここで、評価関数 F の視線誤差項部分 $F_{sight(N)}$ は、 $(x_{11}, y_{11}, z_{11}, x_{12}, y_{12}, z_{12}, \dots, x_{N1}, y_{N1}, z_{N1}, x_{N2}, y_{N2}, z_{N2})$ の $6N$ 個の変数をもつ関数である。理解を助けるため、ステップ $S102$ のループを抜けた時点での対応づけのデータ構造例を図 8 に示す。対応付けの i 回目に基準画像面 2 2 a のエッジ線 $L_{(i)}$ と参照画像面 2 3 a のエッジ線 $R_{(i)}$ を対応づけたとすると、その組合せに対して 3 次元エッジ線 E_i が定義される。基準画像面 2 2 a におけるエッジ線 $L_{(i)}$ 上の画像点 P_{Li1}, P_{Li2} と、参照画像面 2 3 a におけるエッジ線 $R_{(i)}$ 上の点 P_{Ri1}, P_{Ri2} がそれぞれ対応点として求められる。さらに、それぞれの 3 次元エッジ線 E_i は、 $X_{i1} = {}^T(x_{i1}, y_{i1}, z_{i1})$ と $X_{i2} = {}^T(x_{i2}, y_{i2}, z_{i2})$ との 2 つの端点を持っている。さらに、端点の 3 次元座標 X_{ij} ($i = 1, 2, \dots, N, j = 1, 2$) のそれぞれについて、視線誤差項 ($d_{Lij}^2 + d_{Rij}^2$) が定義されている。

10

【0059】

次に、2 本のエッジ線間の拘束条件の設定を行うとともに拘束条件項を求める (ステップ $S107 \sim S111$)。まず、ステップ $S107$ において、拘束条件の追加を行うか否かを判定する。この判定は、ユーザの判断によって追加の要否を入力するようにしてもよく、自動的に判定するようなアルゴリズムを用いてもよい。拘束条件の追加を終了するまで、次のステップ $S108 \sim S111$ の処理を繰り返す。

20

【0060】

次に、拘束条件を設定する 2 本の 3 次元エッジ線を選択する。なお、1 本の 3 次元エッジ線は、ステップ $S103$ 及び $S104$ で設定された一組の組合せに対応している。例えば、図 8 に示された 3 次元エッジ線のリストの中から、ステップ $S108$ において E_1 を選択し、ステップ $S109$ において E_2 を選択する。

【0061】

30

さらに、 $S110$ において、ステップ $S108 \sim S109$ で選択した 2 本のエッジ線に対して、エッジ線間の幾何的な 3 次元拘束条件を選択する。つまり、ワーク 10 について事前に分かっている、エッジ線間の位置関係を設定する。本実施形態においては、2 エッジ線間の幾何関係のうち、「2 エッジ線が同一平面上にある」、「2 エッジ線が同一直線上にある」、「2 エッジ線の方向が平行である」及び「2 エッジ線の方向が垂直である」、の 4 種類を取り扱う。以上の 4 種類の 3 次元拘束条件のうち、1 つを選択してステップ $S111$ に進む。

【0062】

次に、ステップ $S110$ において設定した 3 次元拘束条件に応じて、3 次元拘束条件項 $f_{const(k)}$ を評価関数に追加する (図 4 (b) 参照)。まず、ステップ $S201$ において、追加すべき 3 次元拘束条件項を選択する。以下、各々の 3 次元拘束条件に応じた 3 次元拘束条件項の内容について説明する。なお、以下のステップ $S202 \sim S205$ の説明において、ステップ $S108$ で選択されたエッジ線の両端点を X_{a1}, X_{a2} 、ステップ $S109$ で選択されたエッジ線の両端点を X_{b1}, X_{b2} とする。

40

【0063】

「2 本のエッジ線が同一平面上にある (同一平面項追加、ステップ $S202$) 」という 3 次元拘束条件が選択された場合は、この処理を行う。同一平面項として、2 本のエッジ線が同一平面上に存在するときに値が最小となる関数を用いる。例えば、4 点が同一平面上に存在するという条件は、 X_{a1}, X_{b1}, X_{b2} の 3 点で張った平面上に X_{a2} も存在することから、下記の式で表すことができる。

50

【 0 0 6 4 】

【 数 9 】

$$(\mathbf{X}_{a2} - \mathbf{X}_{a1}) \cdot \{(\mathbf{X}_{b1} - \mathbf{X}_{a1}) \times (\mathbf{X}_{b2} - \mathbf{X}_{a1})\} = 0$$

【 0 0 6 5 】

よって、k 番目の拘束条件項 $f_{const(k)}$ として、下記のような同一平面項 f_{plane} を代入する。

【 0 0 6 6 】

10

【 数 1 0 】

$$f_{const(k)} = f_{plane} = \lambda_k \|(\mathbf{X}_{a2} - \mathbf{X}_{a1}) \cdot \{(\mathbf{X}_{b1} - \mathbf{X}_{a1}) \times (\mathbf{X}_{b2} - \mathbf{X}_{a1})\}\|$$

【 0 0 6 7 】

なお、ここで λ_k は重み係数であり、異なる 3 次元拘束条件間で重みづけを調整するために使用する定数である。重み係数 λ_k は、ユーザが個々に設定するようにしてもよいし、エッジ線の長さに応じて重みづけを決定するアルゴリズムを用いてもよい。

【 0 0 6 8 】

20

次に、「2 本のエッジ線が同一直線上にある」という 3 次元拘束条件が選択された場合は、この処理を行う。同一直線項として、2 本のエッジ線が同一直線上に存在するときに値が最小となる関数を用いる。例えば、3 点が同一直線上にあるという条件は、ベクトルの外積を用いて次の式で表すことができる。

【 0 0 6 9 】

【 数 1 1 】

$$(\mathbf{X}_{a2} - \mathbf{X}_{a1}) \times (\mathbf{X}_{b1} - \mathbf{X}_{a1}) = 0$$

30

【 0 0 7 0 】

よって、k 番目の拘束条件項 $f_{const(k)}$ として、下記のような同一直線項 f_{linear} を代入する。

【 0 0 7 1 】

【 数 1 2 】

$$f_{const(k)} = f_{linear} = \lambda_{k1} \|(\mathbf{X}_{a2} - \mathbf{X}_{a1}) \times (\mathbf{X}_{b1} - \mathbf{X}_{a1})\| + \lambda_{k2} \|(\mathbf{X}_{a2} - \mathbf{X}_{a1}) \times (\mathbf{X}_{b2} - \mathbf{X}_{a1})\|$$

【 0 0 7 2 】

40

なお、ここで λ_{k1} 、 λ_{k2} は重み係数であり、異なる 3 次元拘束条件間で重みづけを調整するために使用する定数である。重み係数 λ_{k1} 、 λ_{k2} は、同一平面項の場合と同様に、ユーザが個々に設定するようにしてもよいし、エッジ線の長さに応じて重みづけを決定するアルゴリズムを用いてもよい。

【 0 0 7 3 】

次に、「2 本のエッジ線が平行である」という 3 次元拘束条件が選択された場合は、この処理を行う。平行項として、2 本のエッジ線が平行であるときに値が最小となる関数を用いる。「2 本のエッジ線が平行である」という条件は、ベクトルの外積を用いて下記の数式で表現することができる。

【 0 0 7 4 】

50

【数 1 3】

$$\|(\mathbf{X}_{a2} - \mathbf{X}_{a1}) \times (\mathbf{X}_{b2} - \mathbf{X}_{b1})\| = 0$$

【0075】

よって、 k 番目の拘束条件項 $f_{const(k)}$ として、下記のような同一直線項 $f_{parallel}$ を代入する。

【0076】

【数 1 4】

10

$$f_{const(k)} = f_{parallel} = \lambda_k \|(\mathbf{X}_{a2} - \mathbf{X}_{a1}) \times (\mathbf{X}_{b2} - \mathbf{X}_{b1})\|$$

【0077】

なお、ここで λ_k は重み係数であり、異なる 3 次元拘束条件間で重みづけを調整するために使用する定数である。他の拘束条件項と同様に、重み係数 λ_k は任意の方法で設定してよい。

【0078】

次に、「2 本のエッジ線が垂直である」という 3 次元拘束条件が選択された場合は、この処理を行う。垂直項として、2 本のエッジ線が垂直であるときに値が最小となる関数を用いる。2 本のエッジ線が垂直である、という条件は、ベクトルの内積を用いて下記の数式で表現することができる。

20

【0079】

【数 1 5】

$$(\mathbf{X}_{a2} - \mathbf{X}_{a1}) \cdot (\mathbf{X}_{b2} - \mathbf{X}_{b1}) = 0$$

30

【0080】

よって、 k 番目の拘束条件項 $f_{const(k)}$ として、下記のような同一直線項 $f_{vertical}$ を代入する。

【0081】

【数 1 6】

$$f_{const(k)} = f_{vertical} = \lambda_k \|(\mathbf{X}_{a2} - \mathbf{X}_{a1}) \cdot (\mathbf{X}_{b2} - \mathbf{X}_{b1})\|$$

【0082】

40

なお、ここで λ_k は重み係数であり、異なる 3 次元拘束条件間で重みづけを調整するために使用する定数である。他の拘束条件項と同様に、重み係数 λ_k は任意の方法で設定してよい。本実施形態に場合、拘束条件項 $f_{const(k)}$ は、 $(x_{a1}, y_{a1}, z_{a1}, x_{a2}, y_{a2}, z_{a2}, x_{b1}, y_{b1}, z_{b1}, x_{b2}, y_{b2}, z_{b2})$ の 12 個の変数をもつ関数である。

【0083】

ステップ S111 において、拘束条件項 $f_{const(k)}$ を追加した後はステップ S107 の処理に戻り、さらに、3 次元拘束条件を追加するか否かを判定する。そして、3 次元拘束条件の追加を終了するまでステップ S108 ~ S111 の処理を繰り返す。3 次元拘束条件項 $f_{const(k)}$ は、矛盾しない範囲で任意の個数設定することができる

50

。例えば、ある2本のエッジ線に対して「同一平面上」と「垂直」という2つの3次元拘束条件を設定することも可能である。ステップS107～S111のループによってM個の3次元拘束条件を設定した場合、評価関数Fの拘束条件項部分 $F_{const(M)}$ は下記ようになる。

【0084】

【数17】

$$F_{const(M)} = \sum_{k=1}^M f_{const(k)}$$

10

【0085】

$F_{const(M)}$ は、 $(x_{11}, y_{11}, z_{11}, x_{12}, y_{12}, z_{12}, \dots, x_{N1}, y_{N1}, z_{N1}, x_{N2}, y_{N2}, z_{N2})$ の最大6N個の変数をもつ関数である。ただし、実際に $F_{const(M)}$ に含まれる変数は、ステップS108～S109において選択されたエッジ線の数に対応する。

【0086】

次に、ステップS102～S106において追加された視線誤差項部分 $F_{sight(N)}$ と、ステップS107～S111の処理において追加された拘束条件項部分 $F_{const(M)}$ とから、評価関数Fを設定する(評価関数設定工程)。上述したように、評価関数Fは、 $F_{sight(N)}$ と、拘束条件項部分 $F_{const(M)}$ と、の和の形で表

20

【0087】

【数18】

$$\begin{aligned} & F(x_{11}, y_{11}, z_{11}, x_{12}, y_{12}, z_{12}, \dots, x_{N1}, y_{N1}, z_{N1}, x_{N2}, y_{N2}, z_{N2}) \\ &= F_{sight(N)} + F_{const(M)} = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^2 (d_{Lij}^2 + d_{Rij}^2) + \sum_{k=1}^M f_{const(k)} \end{aligned}$$

で表される。

30

【0088】

次に、評価関数Fを最少とすることで3次元座標 x_{ij} ($i=1, 2, \dots, j=1, 2$)を求める(3次元座標計測工程)。つまり、評価関数Fに対して、

【0089】

【数19】

$$F(x_{11}, y_{11}, z_{11}, x_{12}, y_{12}, z_{12}, \dots, x_{N1}, y_{N1}, z_{N1}, x_{N2}, y_{N2}, z_{N2}) \Rightarrow \min$$

となるような変数の組 $(x_{11}, y_{11}, z_{11}, x_{12}, y_{12}, z_{12}, \dots, x_{N1}, y_{N1}, z_{N1}, x_{N2}, y_{N2}, z_{N2})$ を求める。この計算は、公知の多変数最適化手法を用いて行えばよく、例えば、非線形探索手法のひとつであるNelder-Meadの滑降シンプレックス法を使用することができる。

40

【0090】

以上の処理により求められた座標値 $(x_{11}, y_{11}, z_{11}, x_{12}, y_{12}, z_{12}, \dots, x_{N1}, y_{N1}, z_{N1}, x_{N2}, y_{N2}, z_{N2})$ は、エッジ線間の3次元拘束条件を考慮して復元された形状となる。しかも、本実施形態によれば、立体的に配置された複数のエッジ線間に、任意の3次元拘束条件を適用することができる。そのため、従来手法に比べて、より高精度な形状を得ることができる。

【0091】

<第2実施形態>

50

次に、本発明の第2実施形態に係るロボット装置1Aについて、図1及び図2を援用すると共に、図10から図12を参照しながら説明する。第2実施形態においては、カメラ制御部5によるワークの3次元座標の計測方法が第1実施形態と相違する。そのため、第2実施形態においては、第1実施形態と相違する点、即ち、カメラ制御部による3次元位置の計測方法を中心に説明し、第1実施形態と同様の構成については同じ符号を付してその説明は省略する。

【0092】

まず、ロボット装置1Aの概略構成について、図1及び図2を援用すると共に、図10を参照しながら説明する。図10は、第2実施形態に係るカメラ制御部5Aの構成を示すブロック図である。

10

【0093】

図1及び図2に示すように、第2実施形態に係るロボット装置1Aは、ロボット2と、架台3と、ロボット2を制御する制御装置4Aと、を備えており、制御装置4Aは、演算装置40Aと、記憶装置41と、を備えている。演算装置40Aは、CPU40aAと、画像処理装置40bと、音声処理装置40cと、を備えており、CPU40aAは、カメラ制御部5Aと、ロボット制御部6と、を備えている。

【0094】

図10に示すように、カメラ制御部5Aは、第1画像エッジ線抽出部51と、第2画像エッジ線抽出部52と、対応点演算部53と、誤差演算部57と、評価関数設定部55と、3次元座標計測部56と、を備えている。誤差演算部57は、仮の3次元座標を設定し、仮の3次元座標に対する第1エッジ線の端点の視線誤差を演算する。また、誤差演算部57は、仮の3次元座標に対する第2エッジ線の端点の視平面誤差を演算する。

20

【0095】

次に、上述のように構成されたロボット装置1Aのハンド21がワークを把持する際の、カメラ制御部5Aによるワークの3次元位置の計測方法について、図11に示すフローチャートに沿って、図12を参照しながら説明する。図11は、第2実施形態に係る3次元座標の計測を示すフローチャートである。図12は、第2実施形態に係る視線誤差と視平面誤差とを説明するための模式図である。

【0096】

基本的な流れとしては、まず、基準カメラ22と参照カメラ23とで、複数の異なる視点から撮影した基準画像面22aと、参照画像面23aと、に対してエッジ線の抽出を行う(ステップS301)。次に、対応づけの追加を繰り返すか否かを判定する(ステップS302)。そして、基準画像面22aの複数のエッジ線の中から第1エッジ線を選択して、参照画像面23aから対応する第2エッジ線を選択する(対応付けを行う)(S303~S304)。そして、基準画像面22aの第1エッジ線に関して視線誤差項を計算する(S305)。同様に、参照画像面23aに関して視平面誤差項を計算する(S306)。さらに、対応付けを行った2本のエッジ線間に幾何的な3次元拘束条件を設定し、3次元拘束条件項を計算する(S307~S311)。最後に、視線誤差項、視平面誤差項及び3次元拘束条件項を含んだ評価関数の値が最小となるように最適化問題を解き、3次元座標を求める(S312)。

30

40

【0097】

第2実施形態においては、第1エッジ線を選択してから対応付けした第2エッジ線を選択するまでの処理ステップS301~S304は、第1実施形態と同様である。また、3次元拘束条件を追加する処理ステップS307~S311も、第1実施形態と同様である。そのため、これらの詳細な説明は省略する。以下においては、第1実施形態と異なる、第1エッジ線の端点の視線誤差項、第2エッジ線の視平面誤差項の追加処理(ステップS305~S306)と3次元座標計算(S312)について説明する。

【0098】

まず、ステップS303において選択された第1エッジ線の端点に対し、視線誤差項を求めて評価関数に追加する。視線誤差項に関する考え方は、第1実施形態と同様であるが

50

、基準画像視線 2 4 に対する視線誤差項のみを追加する。基準画像視線 2 4 に対する視線誤差項 d_{Lij}^2 は、下記ようになる。

【 0 0 9 9 】

【 数 2 0 】

$$d_{Lij}^2 = \left| \frac{\mathbf{P}_{Lij} - \mathbf{O}_L}{\|\mathbf{P}_{Lij} - \mathbf{O}_L\|} \times (\mathbf{X}_{ij} - \mathbf{O}_L) \right|^2 \quad (i=1,2,,N, \quad j=1,2)$$

【 0 1 0 0 】

10

次に、ステップ S 3 0 4 において選択された第 2 エッジ線の両端点から、視平面誤差項を求めて評価関数に追加する。視平面誤差項は、未知の 3 次元座標 X と、選択した第 2 エッジ線上の点群が作る視平面との距離である。視平面を定義するための法線ベクトル \mathbf{n}_R は下記のように求められる。

【 0 1 0 1 】

【 数 2 1 】

$$\mathbf{n}_{Ri} = \mathbf{e}_{Ri2} \times \mathbf{e}_{Ri1}$$

【 0 1 0 2 】

20

参照画像視平面 2 6 と未知の点 X との距離 d は、原点 \mathbf{O}_R から X に向かうベクトルの、法線方向成分の大きさである。よって、視平面誤差項 d'_{Rij} は、下記のように表すことができる。

【 0 1 0 3 】

【 数 2 2 】

$$d'_{Rij} = |\mathbf{n}_{Ri} \cdot (\mathbf{X}_{ij} - \mathbf{O}_R)| \quad (i=1,2,,N, \quad j=1,2)$$

【 0 1 0 4 】

自乗和で評価することとして、以下の項を評価関数に加える。

30

【 0 1 0 5 】

【 数 2 3 】

$$d'_{Rij}^2 = \{\mathbf{n}_{Ri} \cdot (\mathbf{X}_{ij} - \mathbf{O}_R)\}^2 \quad (i=1,2,,N, \quad j=1,2)$$

【 0 1 0 6 】

誤差項を加えたあとは、ステップ S 3 0 2 に戻り、追加の対応付けを終了するか否かの判断を行い、終了と判定されるまでステップ S 3 0 2 ~ S 3 0 6 の処理を繰り返す。処理を繰り返すたびに視線誤差項 d_{Lij}^2 と視平面誤差項 d'_{Rij}^2 が追加される。その結果、N 回の繰り返しを行った場合の評価関数 F の誤差項部分 $F_{sight(N)}$ は、下記ようになる。

40

【 0 1 0 7 】

【 数 2 4 】

$$F_{sight(N)} = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^2 (d_{Lij}^2 + d'_{Rij}^2)$$

【 0 1 0 8 】

ステップ S 3 0 2 において終了と判定した後は、ステップ S 3 0 7 ~ S 3 1 1 において

50

拘束条件の追加処理を行う。なお、前述の通り、3次元拘束条件の追加処理は、第1実施形態におけるステップS107～S111と同様の処理であるため説明は省略する。本実施形態のように、視線誤差項の代わりに視平面誤差項を用いた場合でも、3次元拘束条件項として同じ計算式が適用できる。

【0109】

次に、ステップS302～S306において追加された視線誤差項及び視平面誤差項と、ステップS307～S311の処理において追加された3次元拘束条件項と、を統合した評価関数Fを設定する(評価関数設定工程)。上述したように、評価関数Fは、 $F_{sight(N)}$ と、拘束条件項部分 $F_{const(M)}$ と、の和の形で表される。即ち、

【0110】

【数25】

$$F(x_{11}, y_{11}, z_{11}, x_{12}, y_{12}, z_{12}, \dots, x_{N1}, y_{N1}, z_{N1}, x_{N2}, y_{N2}, z_{N2}) \\ = F_{sight(N)} + F_{const(M)} = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^2 (d_{Lij}^2 + d'_{Rij}^2) + \sum_{k=1}^M f_{const(k)}$$

で表される。

【0111】

次に、評価関数Fを最少とすることで3次元座標 x_{ij} ($i = 1, 2, \dots, N$, $j = 1, 2$)を求める(3次元座標計測工程)。つまり、評価関数Fに対して、

【0112】

【数26】

$$F(x_{11}, y_{11}, z_{11}, x_{12}, y_{12}, z_{12}, \dots, x_{N1}, y_{N1}, z_{N1}, x_{N2}, y_{N2}, z_{N2}) \Rightarrow \min$$

となるような変数の組($x_{11}, y_{11}, z_{11}, x_{12}, y_{12}, z_{12}, \dots, x_{N1}, y_{N1}, z_{N1}, x_{N2}, y_{N2}, z_{N2}$)を求める。この計算は、第1実施形態と同様に、公知の多変数最適化手法を用いて、変数の組を求めることができる。

【0113】

以上説明したように、本実施形態に係る3次元位置の計測方法によれば、ワークのエッジ線を近似した線同士の位置関係について、既知の立体的な拘束条件を複数同時に反映した3次元形状計測を行うことができる。そのため、従来に比して高精度な3次元形状データを得ることができる。

【0114】

また、本実施形態に係る3次元位置の計測方法によれば、3次元座標を計算する際に「エピポーラ拘束を用いて対応点を一意に求める」という処理を行う必要がなくなる。そのため、基準画像面22aから抽出した第1エッジ線に対して先に参照画像面23a上の対応点を求める必要がなくなる。これにより、カメラパラメータの誤差やエッジ線抽出の誤差等によってエピポーラ拘束自体が満たされていない場合は、対応点を求める方法を用いた場合は対応点が正確でなくなるが、本実施形態の方法を用いることで、この影響を軽減することができる。

【0115】

以上、本発明の実施形態について説明したが、本発明は上述した実施形態に限定されるものではない。また、本発明の実施形態に記載された効果は、本発明から生じる最も好適な効果を列挙したに過ぎず、本発明による効果は、本発明の実施形態に記載されたものに限定されない。

【0116】

例えば、本実施形態においては、説明を簡単化するために基準カメラと参照カメラの2

10

20

30

40

50

つのカメラを用いて説明したが、本発明においてはこれに限定されない。例えば、カメラが3つ以上の場合においても、参照カメラに対する視平面誤差項を追加することにより、本発明の方法を適用可能である。また、ワークに対する視点が異なれば、同一のカメラを動かしながら複数回撮影した画像を用いることもできる。

【0117】

また、例えば、本実施形態においては、評価関数を最少とすることで3次元座標を求めたが、本発明においてはこれに限定されない。例えば、評価関数を最大とすることで3次元座標を求めてもよい。

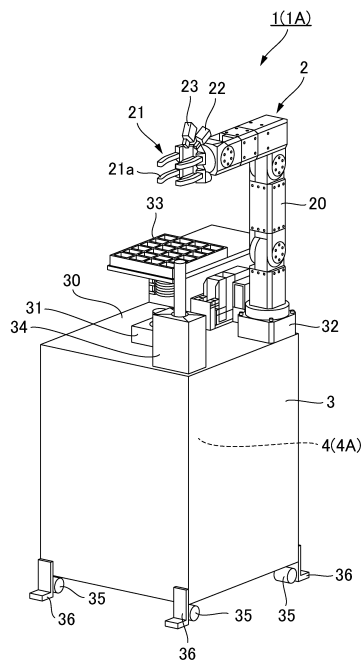
【符号の説明】

【0118】

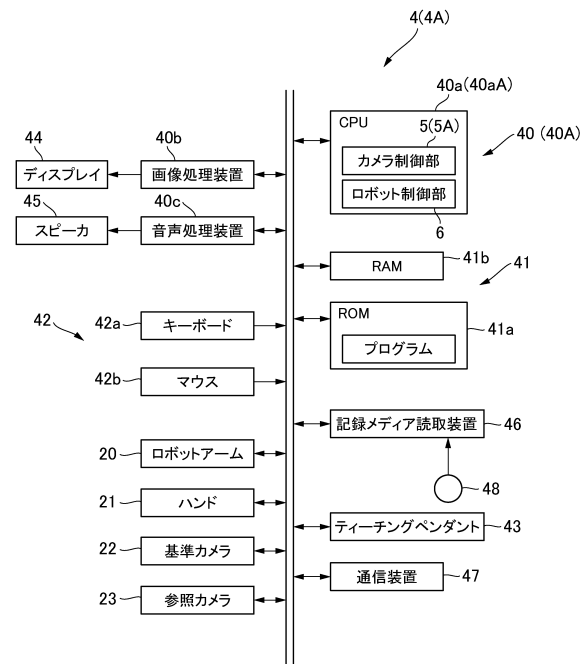
- 1、1 A ロボット装置
- 2 ロボット
- 5、5 A カメラ制御部（制御部）
- 10 ワーク
- 22 基準カメラ（第1カメラ）
- 22 a 基準画像面（第1画像）
- 23 参照カメラ（第2カメラ）
- 23 a 参照画像面（第2画像）

10

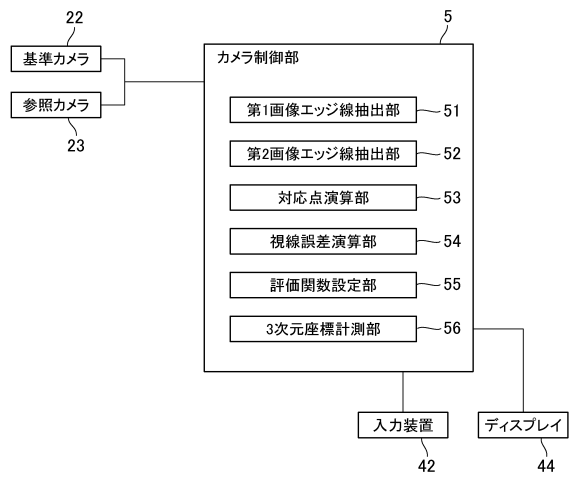
【図1】



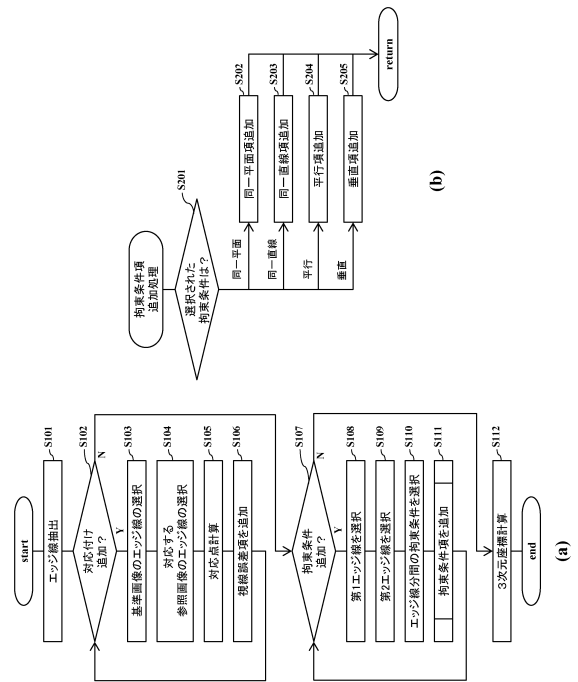
【図2】



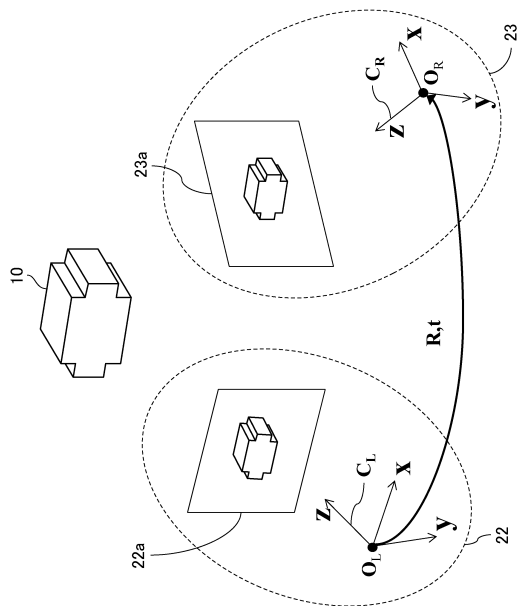
【図 3】



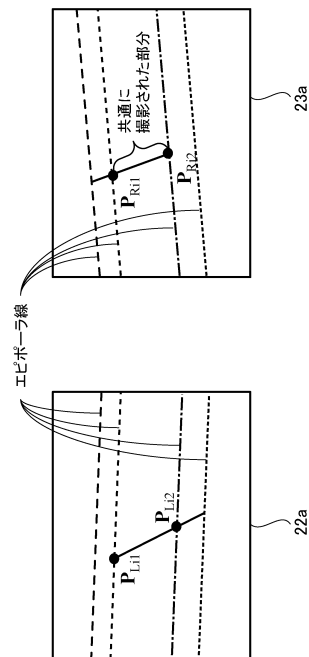
【図 4】



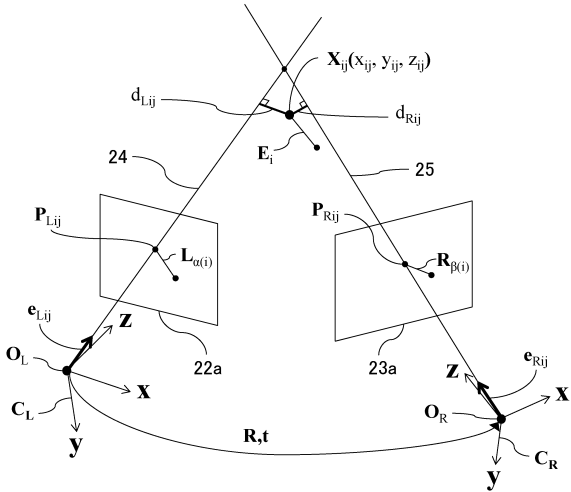
【図 5】



【図 6】



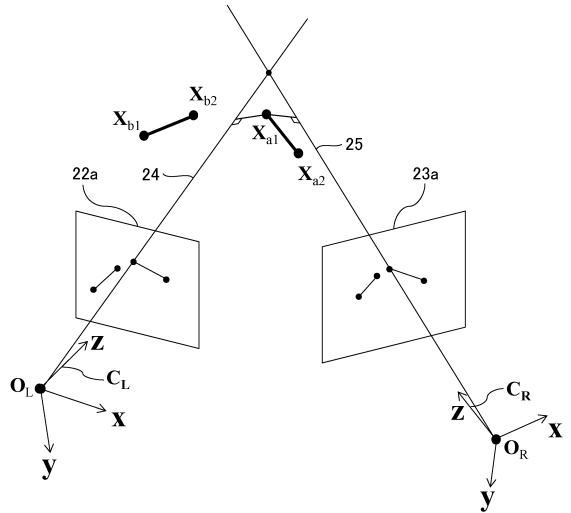
【図 7】



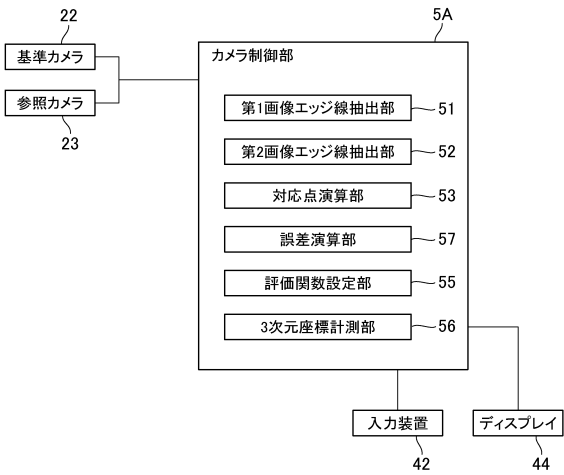
【図 8】

対応番号	基準画像エッジ線	参照画像エッジ線	3次元エッジ線	基準画像上の対応点	参照画像上の対応点	3次元エッジ線端点の座標	視線誤差項
1	L_2	R_1	E_1	P_{L11}	P_{R11}	$X_{11}^{*}=(x_{11}, y_{11}, z_{11})$	$d_{L1}^2+d_{R1}^2$
				P_{L12}	P_{R12}	$X_{12}^{*}=(x_{12}, y_{12}, z_{12})$	$d_{L1}^2+d_{R12}^2$
2	L_3	R_2	E_2	P_{L21}	P_{R21}	$X_{21}^{*}=(x_{21}, y_{21}, z_{21})$	$d_{L2}^2+d_{R21}^2$
				P_{L22}	P_{R22}	$X_{22}^{*}=(x_{22}, y_{22}, z_{22})$	$d_{L22}^2+d_{R22}^2$
⋮							
i	$L_{\alpha(i)}$	$R_{\beta(i)}$	E_i	P_{Li1}	P_{Ri1}	$X_{i1}^{*}=(x_{i1}, y_{i1}, z_{i1})$	$d_{Li}^2+d_{Ri1}^2$
				P_{Li2}	P_{Ri2}	$X_{i2}^{*}=(x_{i2}, y_{i2}, z_{i2})$	$d_{Li2}^2+d_{Ri2}^2$
⋮							
N	$L_{\alpha(N)}$	$R_{\beta(N)}$	E_N	P_{LN1}	P_{RN1}	$X_{N1}^{*}=(x_{N1}, y_{N1}, z_{N1})$	$d_{LN}^2+d_{RN1}^2$
				P_{LN2}	P_{RN2}	$X_{N2}^{*}=(x_{N2}, y_{N2}, z_{N2})$	$d_{LN2}^2+d_{RN2}^2$

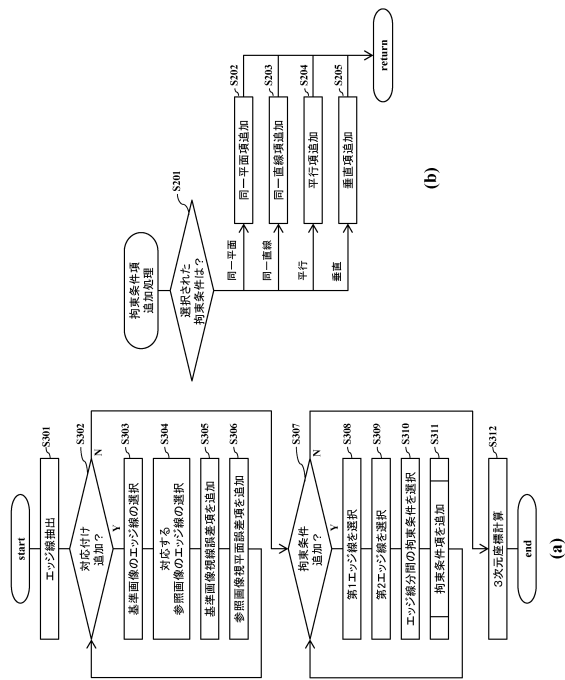
【図 9】



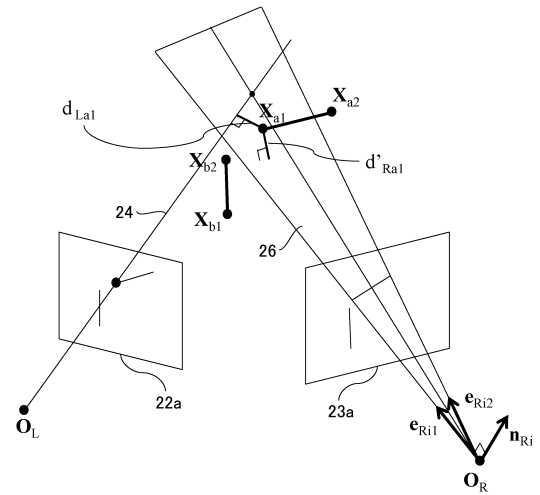
【図 10】



【図 1 1】



【図 1 2】



 フロントページの続き

(51)Int.Cl.			F I		
G 0 6 T	1/00	(2006.01)	G 0 6 T	1/00	3 1 5
			G 0 6 T	1/00	3 0 0

(56)参考文献 特開 2 0 0 6 - 0 0 3 1 5 7 (J P , A)
 特開 2 0 1 0 - 1 1 7 2 2 3 (J P , A)
 金谷健一, 画像理解のための統計学: 画像の幾何学的解釈の信頼性評価, 情報処理, 1 9 9 6 年
 1 月 1 5 日, V o l . 3 7 , N o . 1 , p . 5 2 - 6 0

(58)調査した分野(Int.Cl. , D B 名)

G 0 1 B	1 1 / 0 0 - 1 1 / 3 0
G 0 3 B	1 5 / 0 0
G 0 3 B	1 9 / 0 7
G 0 3 B	3 5 / 0 8
G 0 6 T	1 / 0 0
H 0 4 N	1 3 / 0 2