

(19) 日本国特許庁(JP)

(12) 公開特許公報(A)

(11) 特許出願公開番号

特開2016-221645

(P2016-221645A)

(43) 公開日 平成28年12月28日(2016.12.28)

(51) Int.Cl.

B25J 9/10 (2006.01)

F1

B25J 9/10

A

テーマコード (参考)

3C707

審査請求 未請求 請求項の数 12 O L (全 22 頁)

(21) 出願番号 特願2015-111972 (P2015-111972)
(22) 出願日 平成27年6月2日 (2015.6.2)

(71) 出願人 000002369
セイコーエプソン株式会社
東京都新宿区新宿四丁目1番6号
(74) 代理人 100116665
弁理士 渡辺 和昭
(74) 代理人 100164633
弁理士 西田 圭介
(74) 代理人 100179475
弁理士 仲井 智至
(72) 発明者 石毛 太郎
長野県諏訪市大和3丁目3番5号 セイコーエプソン株式会社内
(72) 発明者 原田 篤
長野県諏訪市大和3丁目3番5号 セイコーエプソン株式会社内

最終頁に続く

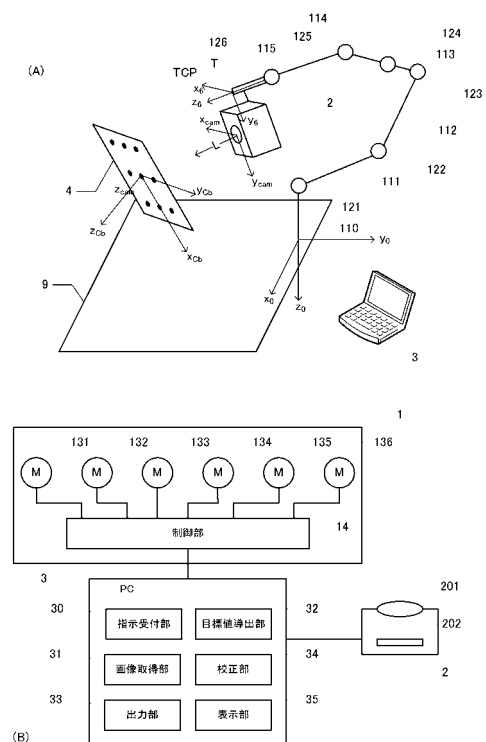
(54) 【発明の名称】 ロボット、ロボット制御装置およびロボットシステム

(57) 【要約】

【課題】 水平でない平面を基準にしてロボットを制御することを容易にする。

【解決手段】 ロボットは、水平でない作業平面内の3点以上を示すマーカーが撮像された画像に基づいて前記作業平面と平行で互いに直交する2軸を有するローカル座標系を導出するローカル座標系導出部と、前記ローカル座標系を介して制御パラメーターを取得する制御パラメーター取得部と、を備える。

【選択図】 図1



【特許請求の範囲】**【請求項 1】**

水平でない作業平面内の 3 点以上を示すマーカーが撮像された画像に基づいて前記作業平面と平行で互いに直交する 2 軸を有するローカル座標系を導出するローカル座標系導出部と、

前記ローカル座標系を介して制御パラメーターを取得する制御パラメーター取得部と、
を備えるロボット。

【請求項 2】

前記制御パラメーターは制御対象点が移動する目標点の座標である、
請求項 1 に記載のロボット。

10

【請求項 3】

前記制御対象点を前記作業平面に対して平行に移動させる制御モードを有する、
請求項 2 に記載のロボット。

【請求項 4】

前記制御パラメーター取得部は、前記作業平面を撮像した画像の座標をオペレーターが指定すると、前記作業平面を撮像した画像の座標を前記目標点としての前記ローカル座標系の座標に変換する、

請求項 1 ~ 3 のいずれか一項に記載のロボット。

【請求項 5】

前記制御パラメーター取得部は、前記画像の座標系と前記ローカル座標系を介して前記
制御パラメーターを取得する、

20

請求項 1 ~ 4 のいずれか一項に記載のロボット。

【請求項 6】

前記制御パラメーターによって制御されるアームを備える、

請求項 1 ~ 5 のいずれか一項に記載のロボット。

【請求項 7】

前記制御パラメーターは、前記アームに装着されるツールの姿勢である、

請求項 6 に記載のロボット。

【請求項 8】

前記アームに設けられ、前記マーカーを撮像する撮像部を備える、

30

請求項 1 ~ 7 のいずれか一項に記載のロボット。

【請求項 9】

前記アームを動かすことにより前記マーカーと前記撮像部との位置関係を変化させ、

前記撮像部と前記マーカーの位置関係が変化した後前記撮像部によって前記マーカーが撮像された画像に基づいて、前記撮像部によって撮像される画像の座標系とロボットの基準座標系との校正が行われる、

請求項 8 に記載のロボット。

【請求項 10】

前記アームを動かすことにより前記位置関係を前記作業平面と前記撮像部の光軸とが垂直な状態に変化させ、

40

前記校正は、前記位置関係が前記状態にあるときに前記撮像部によって前記マーカーが撮像された画像に基づいて行われる、

請求項 8 または 9 に記載のロボット。

【請求項 11】

水平でない作業平面上においてワークを処理するロボットを制御するロボット制御装置であって、

前記作業平面内の 3 点以上を示すマーカーが撮像された画像に基づいて前記作業平面と平行で互いに直交する 2 軸を有するローカル座標系を導出するローカル座標系導出部と、

前記ローカル座標系を介して前記ロボットの制御パラメーターを取得する制御パラメーター取得部と、

50

を備えるロボット制御装置。

【請求項 12】

水平でない作業平面上においてワークを処理するロボットと、前記ロボットを制御するロボット制御装置とを備えるロボットシステムであって、

前記作業平面内の 3 点以上を示すマーカーが撮像された画像に基づいて前記作業平面と平行で互いに垂直な 2 軸を有するローカル座標系を導出するローカル座標系導出部と、

前記ローカル座標系を介して前記ロボットの制御パラメーターを取得する制御パラメーター取得部と、

を備えるロボットシステム。

【発明の詳細な説明】

10

【技術分野】

【0001】

本発明は、ロボット、ロボット制御装置およびロボットシステムに関する。

【背景技術】

【0002】

従来、ロボットを用いてワークを処理するにあたっては、ワークの位置やワークに対するツールの姿勢などを予めロボットに教示しておく必要がある。ここでツールとは、ワークを処理するために用いられるハンドなどであって、ワークの形態と処理内容に応じてロボットに装着されるアタッチメントである。ワークの位置やワークに対するツールの姿勢などをロボットに教示する場合、実際のワークの位置を目標点としてツールの先端等の制御対象点をジョグ送り操作によって目標点まで移動させ、移動後の位置をロボットに記憶させる方法が一般的である。

20

【先行技術文献】

【特許文献】

【0003】

【特許文献 1】特開 2012 - 228757 号公報

【発明の概要】

【発明が解決しようとする課題】

【0004】

ところで、ロボットが処理するワークの対象面は必ずしも水平面（鉛直方向と垂直な面）ではない。例えば三角柱形態のワークの側面の 1 つにドリルで複数の穴を形成する処理であれば、他の側面を底面として水平な作業台上にワークを載置すると、穴を形成すべき対象面は水平ではない傾斜面になる。この場合、傾斜した対象面上にある穿孔位置と、ドリルの回転軸が対象面と垂直になる姿勢を教示することとなる。しかし、このような教示作業は容易ではなく、また、高精度に実施することは困難である。

30

【0005】

本発明は、このような問題を解決するために創作されたものであって、水平でない平面を基準にしてロボットを制御することを容易にすることを目的とする。

【課題を解決するための手段】

【0006】

40

上記目的を達成するためのロボットは、水平でない作業平面内の 3 点以上を示すマーカーが撮像された画像に基づいて前記作業平面と平行で互いに直交する 2 軸を有するローカル座標系を導出するローカル座標系導出部と、前記ローカル座標系を介して制御パラメーターを取得する制御パラメーター取得部と、を備える。

【0007】

ここで作業平面とは、ロボットをワークに対して制御する際の基準となる平面であって、ロボットが処理するワークを載置する面やワークの対象面やこれらに平行な平面など、ワークに様々な処理を施す際に基準とする平面である。またローカル座標系を導出するとは、予め定義されている基準座標系で表された位置と、当該ローカル座標系で表された位置との対応関係が明らかな状態にすることであって、例えば座標変換行列を導出すること

50

を含む。また制御パラメータとは、ロボットを制御する際に用いる位置、方向、姿勢、距離、速度、加速度、角速度、角加速度等の制御量を示す数値である。したがって、「ローカル座標系を介して制御パラメータを取得する」とは、ローカル座標系によってその数値（制御パラメータ）の幾何学的な意味合いが解釈される状態で制御パラメータが取得されることを意味する。なお、制御パラメータ自体がローカル座標系の座標や方向を示していなくとも良く、例えばローカル座標系に対応する別の座標系の座標や方向を制御パラメータとして外部のシステムやオペレーターの入力操作によって取得した後に、変換行列を用いてローカル座標系の座標や方向を取得しても良いし、ローカル座標系の座標や方向を外部のシステムやオペレーターの入力操作によって取得した後に、変換行列を用いて別の座標系の座標や方向を取得しても良い。

10

【0008】

本発明によると、画像に基づいてローカル座標系が導出され、導出されたローカル座標系を介して制御パラメータをロボットに取得させることができるため、水平でない平面を基準にしてロボットを制御することが容易になる。

【0009】

なお請求項に記載された各手段の機能は、構成自体で機能が特定されるハードウェア資源、プログラムにより機能が特定されるハードウェア資源、又はそれらの組み合わせにより実現される。また、これら各手段の機能は、各々が物理的に互いに独立したハードウェア資源で実現されるものに限定されない。

20

【図面の簡単な説明】

【0010】

【図1】図1Aは本発明の実施形態にかかる模式的な斜視図。図1Bは本発明の実施形態にかかるブロック図。

【図2】図2Aは本発明の実施形態にかかる平面図、図2Bは本発明の実施形態にかかる側面図である。

【図3】本発明の実施形態にかかる平面図。

【図4】本発明の実施形態にかかるフローチャート。

【図5】本発明の実施形態にかかるフローチャート。

【図6】本発明の実施形態にかかるフローチャート。

【図7】本発明の実施形態にかかる模式図。

30

【図8】本発明の実施形態にかかる画像を示す図。

【図9】本発明の実施形態にかかる模式図。

【図10】本発明の実施形態にかかる画像を示す図。

【図11】本発明の実施形態にかかるフローチャート。

【図12】本発明の実施形態にかかる画像を示す図。

【図13】本発明の実施形態にかかる模式図。

【図14】本発明の実施形態にかかるフローチャート。

【図15】本発明の実施形態にかかるフローチャート。

【図16】本発明の実施形態にかかる模式的な斜視図。

【図17】本発明の実施形態にかかる模式的な斜視図。

40

【図18】本発明の実施形態にかかる画像を示す図。

【発明を実施するための形態】

【0011】

以下、本発明の実施の形態を添付図面を参照しながら説明する。尚、各図において対応する構成要素には同一の符号が付され、重複する説明は省略される。

1. ロボットシステムの構成

本発明の一実施例としてのロボットシステムは、図1に示すように、ロボット1と、カメラ2と、ロボット制御装置としてのPC（Personal Computer）3とを備えている。

【0012】

図1Aに簡略化して示すように、ロボット1は、6つの回転軸部材121、122、1

50

2 3、1 2 4、1 2 5、1 2 6によって屈曲するマニピュレータを備える単腕 6 軸ロボットである。基台 1 1 0 は、第一アーム 1 1 1 の回転軸部材 1 2 1 を支持している。第一アーム 1 1 1 は回転軸部材 1 2 1 の中心軸を中心にして回転軸部材 1 2 1 とともに基台 1 1 0 に対して回転する。第一アーム 1 1 1 は、第二アーム 1 1 2 の回転軸部材 1 2 2 を支持している。第二アーム 1 1 2 は、回転軸部材 1 2 2 の中心軸を中心にして回転軸部材 1 2 2 とともに第一アーム 1 1 1 に対して回転する。第二アーム 1 1 2 は、第三アーム 1 1 3 の回転軸部材 1 2 3 を支持している。第三アーム 1 1 3 は、回転軸部材 1 2 3 の中心軸を中心にして回転軸部材 1 2 3 とともに第二アーム 1 1 2 に対して回転する。第三アーム 1 1 3 は、第四アーム 1 1 4 の回転軸部材 1 2 4 を支持している。第四アーム 1 1 4 は、回転軸部材 1 2 4 の中心軸を中心にして回転軸部材 1 2 4 とともに第三アーム 1 1 3 に対して回転する。第四アーム 1 1 4 は、第五アーム 1 1 5 の回転軸部材 1 2 5 を支持している。第五アーム 1 1 5 は、回転軸部材 1 2 5 の中心軸を中心にして回転軸部材 1 2 5 とともに第四アーム 1 1 4 に対して回転する。第五アーム 1 1 5 は、ツールが装着される回転軸部材 1 2 6 を支持している。

10

20

30

40

50

【0013】

先端の回転軸部材 1 2 6 には、図 2 に示すように、ワークを操作するための各種のツールが装着されるツールチャック 1 2 6 1 が設けられている。図 2 A に示すように、ツールチャック 1 2 6 1 の取付面は、放射状に分割されており、その中央部にツールの棒状の軸部 T J が装着される。ツールチャック 1 2 6 1 は、回転軸部材 1 2 6 の回転軸上に各種のツールの軸部 T J を挟み込んで保持する。したがってツールがツールチャック 1 2 6 1 に正しく装着された状態において、ツールの軸部 T J の中心軸は、回転軸部材 1 2 6 の回転軸と一致する。ここでロボット 1 を用いてワークを把持する際にロボット 1 とワークとの接触点になる部分など、一般的には対象物に最も近い部分のロボット 1 側の基準点をツールセンターポイント (T C P) という。本実施例において T C P は制御対象点となる。

【0014】

図 1 B に示すように、ロボット 1 は、回転軸部材 1 2 1 を駆動するモーター 1 3 1 と、回転軸部材 1 2 2 を駆動するモーター 1 3 2 と、回転軸部材 1 2 3 を駆動するモーター 1 3 3 と、回転軸部材 1 2 4 を駆動するモーター 1 3 4 と、回転軸部材 1 2 5 を駆動するモーター 1 3 5 と、回転軸部材 1 2 6 を駆動するモーター 1 3 6 と、モーター 1 3 1 ~ 1 3 6 を制御する制御部 1 4 とを備えている。モーター 1 3 1 ~ 1 3 6 は、目標値と現在値との差分がゼロになるようにフィードバック制御されるサーボモーターである。制御部 1 4 は、T C P の位置と姿勢を示す目標値や J O G 送り指示を P C 3 から取得し、目標値と J O G 送り指示に基づいてモーター 1 3 1 ~ 1 3 6 を制御する。

【0015】

ロボット 1 を制御する際には、全ての座標系の基準となる基準座標系 R b の他に、各回転軸部材に対して固定され各回転軸部材とともに回転する座標系 J 1 ~ J 6 と、特定のワークをロボットビジョンを用いて処理する際に用いられるローカル座標系 L c が用いられる。これらの座標系の長さの単位はミリメートル、角度の単位は度である。ロボット 1 の基準座標系 R b は、それぞれが水平な x_0 軸と y_0 軸と、鉛直下向きを正方向とする z_0 軸とによって定まる 3 次元の直交座標系であって、ロボット 1 が設置されることによってロボット 1 が動作する空間に固定される。回転軸部材 1 2 6 とともに回転する座標系 J 6 は、T C P を原点とし、回転軸部材 1 2 6 の回転軸と平行な z_6 軸と、 z_6 軸に対してそれぞれが垂直な x_6 軸と y_6 軸とによって定まる 3 次元の直交座標系である。なお、各座標系の z 軸周りの回転を u 、 y 軸周りの回転を v 、 x 軸周りの回転を w で表す。

【0016】

ツールチャック 1 2 6 1 には、カメラ 2 と任意のツールとを取り付けるための延長チャック T が固定される。撮像部としてのカメラ 2 は、その光軸 L が回転軸部材 1 2 6 の回転軸と平行になるように延長チャック T に固定されている。カメラ 2 は、レンズ 2 0 1、エリアイメージセンサー 2 0 2、図示しない A D 変換器等を備え、作業平面内におけるワークの大きさ、形状、位置、姿勢を認識するための撮像装置である。なお、本実施例で校正

されるロボットビジョンは、予め決められた作業平面を対象とする二次元のロボットビジョンである。このため、レンズ201には、被写界深度が浅く（焦点距離が長く）F値が小さな単焦点レンズを用いることが好ましい。

【0017】

カメラ2の位置と姿勢を定義するためにカメラ座標系Camが定義される。カメラ座標系Camは、図1Aに示すように、撮像位置を原点とし、光軸Lと対応する z_{cam} 軸と、イメージセンサー202の水平方向と対応する x_{cam} 軸と、イメージセンサー202の垂直方向と対応する y_{cam} 軸とを有し、J6座標系に対して固定された3次元の直交座標系である。撮像位置は、光軸Lとイメージセンサー202の交点とする。カメラ座標系Camは、回転軸部材1261に固定されたJ6座標系における撮像位置(x_6 、 y_6 、 z_6)とJ6座標系におけるカメラ座標系Camの姿勢(u_6 、 v_6 、 w_6)とを成分とするカメラ設定によって定義される。カメラ座標系Camの姿勢は、J6座標系の各軸を中心としてカメラ座標系Camが何度ずつ回転しているかを表している。

【0018】

カメラ2から出力される画像の座標系を画像座標系Imという。画像座標系Imの長さの単位はピクセル、角度の単位は度である。画像座標系Imと基準座標系Rbとを対応付けることによって、作業平面内においてワークの位置、姿勢、形状を画像認識することが可能になる。したがって、カメラ2が出力する画像に基づいてワークの位置等を認識して、認識結果に基づいてロボット1を制御するためには、画像座標系Imと基準座標系Rbとを関係づける処理、すなわち校正が必要になる。画像座標系Imと基準座標系Rbとの関係は、レンズ201の光学特性（焦点距離、歪みなど）とエリアイメージセンサー202の画素数と大きさに応じて定まる。校正では、基準座標系Rbと画像座標系Imとの非線形な対応関係を示す変換行列が求められる。

【0019】

ところで、作業平面が水平でない場合、 x_0 、 y_0 平面が水平な基準座標系Rbを介してロボット1を制御したり操作するよりも、作業平面と平行な2軸を有する座標系を介してロボット1を制御したり操作する方が容易である。そこで本実施例では、水平面と任意の角度をなす作業平面と平行な2軸を有するローカル座標系Lcを次のように定義する。

【0020】

ローカル座標系Lcは、ロボットビジョンの視点（撮像位置）を原点とし、作業平面に対して垂直でかつカメラ2の光軸Lと平行な z_{Lc} 軸と、作業平面に対して平行でカメラ2の光軸Lと垂直で画像座標系の水平軸と平行な x_{Lc} 軸と、作業平面に対して平行でカメラ2の光軸Lと垂直で画像座標系の垂直軸と平行な y_{Lc} 軸とを有し、基準座標系Rbに対して固定された3次元の直交座標系である。すなわち、ローカル座標系Lcは、基準座標系Rbで表される撮像位置と撮像姿勢とカメラ設定とによって、作業平面に対して都度設定される。したがってカメラ設定が正確でなければ、ローカル座標系Lcを定義通りに設定することができず、ローカル座標系Lcを介して意図通りにロボット1を制御することができない。カメラ設定には、カメラ2の位置と姿勢の他、レンズ201の焦点距離、主点、歪み等、レンズ201の光学特性に基づく情報が含まれる。焦点距離、主点、歪み等はカメラ2にとって不変であるため、これらのレンズ201の光学特性に基づくカメラ設定は、予め決められた値が用いられる。

【0021】

ロボット制御装置としてのPC3はロボット1とカメラ2に通信可能に接続されている。PC3には、ローカル座標系Lcを設定して基準座標系Rbと画像座標系Imとを校正するための校正プログラムや、TCPに対するカメラ2とツールのオフセットを設定するためのツールセットプログラムや、教示プログラムなどの各種のコンピュータプログラムがインストールされている。PC3は、図示しないプロセッサ、DRAMからなる図示しない主記憶、図示しない入出力機構、不揮発性メモリからなる図示しない外部記憶、キーボード等を備えるコンピュータである。またPC3は、カメラ2で撮像した画像やGUIを表示するための画面を有する表示部35を備えている。PC3は、外部記憶に記憶

10

20

30

40

50

されたプログラムをプロセッサで実行することにより、指示受付部 30、画像取得部 31、目標値導出部 32、出力部 33、校正部 34として機能する。

【0022】

指示受付部 30は、カメラ 2によって撮像された画像やGUIを表示部 35の画面に表示する。また指示受付部 30は各種の処理の開始指示を受け付けたり、目標位置や目標姿勢といった制御パラメータを、GUIを介して取得する。すなわち指示受付部は、制御パラメータ取得部として機能する。

【0023】

画像取得部 31は、カメラ 2に対して撮像を指示し、作業平面に含まれる基準点を示すマーカーが指示に応じて撮像された画像をカメラ 2から取得する。本実施例では、作業平面を可視化するために図 1A および図 3に示すマーカーボード 4を用いる。図 3に示すように、マーカーボード 4は、円形の輪郭を有する 9つのマーカー 41～49が平坦な面の所定の格子点に付された板である。各マーカー 41～49の中心が基準点に相当する。マーカーボード 4上の各マーカー 41～49の中心位置はマーカーボード 4に固定された 2次元の座標系（マーカー座標系 C_b ）で PC 3が保持する。なお、マーカーはマーカーが撮像された画像からマーカーを検出することにより基準点を特定可能な形態であればよい。すなわち、特定の点の位置をマーカーの図形に対して幾何学的に定義できる形態であればよい。マーカーから離れた点が基準点として定義されてもよいし、1つのマーカーから複数の基準点が定義されてもよいし、互いに離れた複数のマーカーで1つの基準点が定義されてもよい。またマーカーによって平面を特定できればよいため、マーカーが指し示す基準点の数は 3以上であればよい。

【0024】

目標値導出部 32は、カメラ 2とマーカー 41～49の位置関係を予め決められた状態に変化させるための目標値を、カメラ 2が撮像した画像に基づいて導出する。具体的には、目標値導出部 32は、カメラ 2が撮像した画像に基づいて、予め決められた状態に対応する TCP の目標値を導出する。目標値導出部 32は、目標値を導出する過程において、画像座標系 I_m からローカル座標系 L_c への座標変換や、ローカル座標系 L_c から基準座標系 R_b への座標変換を実行する。また目標値導出部 32は、基準座標系 R_b とローカル座標系 L_c の対応関係を定める変換行列 ${}^{R_b}R_{L_c}$ を、カメラ 2によって撮像された画像と TCP の位置と姿勢とカメラ設定とに基づいて導出することによりローカル座標系 L_c を設定する。すなわち目標値導出部 32はローカル座標系導出部として機能する。

【0025】

校正部 34は、画像座標系 I_m と基準座標系 R_b の対応関係を定める変換行列 ${}^{I_m}R_{R_b}$ を導出する。校正部 34は、それぞれに対応する目標値を目標値導出部 32が導出する以下の垂直状態と合焦状態にカメラ 2とマーカー 41～49（基準点 $P_1 \sim P_9$ ）の位置関係が定められた後に、変換行列 ${}^{I_m}R_{R_b}$ を導出する。

- ・垂直状態：マーカーボード 4とカメラ 2の光軸が垂直な状態
- ・合焦状態：マーカーボード 4にカメラ 2が合焦する状態

【0026】

合焦状態は、合焦の指標である画像のシャープネスによって定まる。なお、本実施例では、画像の予め決められた領域（部分画像）のシャープネスが最大になる状態を合焦状態とするが、合焦の指標に閾値を設けることにより合焦状態に何らかの幅を持たせてもよい。

【0027】

出力部 33は、目標値導出部 32によって導出された目標値をロボット 1の制御部 14に出力することにより、ロボット 1を動作させる。

【0028】

2. 自動カメラ設定

次に自動カメラ設定について図 4を参照しながら説明する。自動カメラ設定は、カメラ設定としての撮像位置と撮像姿勢を自動的に設定する処理である。自動カメラ設定は、オ

10

20

30

40

50

ペレーターが開始指示をPC3に入力することによって起動する。その後、オペレーターに一切の操作を要求することなく完了してもよい。開始指示は、自動カメラ設定を開始するためのトリガーである。従って、ロボット1を操作するための目標値を含んでいなくてもよい。開始指示を入力する前にオペレーターに求められるのは、マーカーボード4を任意の位置と姿勢に設置することと、カメラ2によってマーカーボード4をだいたい正面から撮像できる状態にTCPを移動させるジョグ送り操作だけであってもよい。

【0029】

開始指示がPC3に入力されると(S1)、PC3は、画像に基づいてカメラ2の光軸Lをマーカーボード4に対して垂直にする光軸傾き補正を実行する(S2)。傾き補正では、カメラ2によるマーカーボード4の撮像が行われ、9つの基準点を示すマーカー41 ~ 49が画像座標系Imで検出される。そして、検出結果に基づいて、マーカーボード4とカメラ2の光軸が垂直になり中央のマーカー45を画像の重心に位置づけるための目標値が導出されてアーム111 ~ 115が動く。この時点では、カメラ2の焦点がマーカーボード4に合っていないため、マーカーボード4とカメラ2の光軸Lが凡そ垂直でマーカー45の重心と画像の重心がほぼ一致する低精度垂直状態になる。詳細は後述する。

【0030】

低精度垂直状態になると、PC3はローカル座標系Lcの仮設定を実行する(S3)。具体的には回転軸部材121 ~ 125の回転角度とカメラ設定とに基づいて暫定的な変換行列 ${}^R_b R_{L_c}$ が導出される。低精度垂直状態は、カメラ2によって撮像された画像に基づいて設定されるが、画像座標系Imと基準座標系Rbとの校正が完了しておらず、カメラ設定も補正されていないこの段階では、回転軸部材121 ~ 125の回転角度とカメラ設定とに基づいて設定するローカル座標系Lcの z_{L_c} 軸はカメラ2の光軸Lと平行にならず、ローカル座標系Lcの x_{L_c} 軸はイメージセンサー202の水平方向と平行にならず、ローカル座標系Lcの y_{L_c} 軸はイメージセンサー202の垂直方向と平行にならない。

【0031】

次にPC3は、焦点調整を実行する(S4)。焦点調整では、ローカル座標系Lcの z_{L_c} 軸と平行な方向にカメラ2を移動させながらカメラ2によるマーカーボード4の撮像が繰り返し行われ、画像に写るマーカー41 ~ 49のシャープネスが最大になる合焦状態が探索される。さらにPC3は、探索結果に基づいて合焦状態にするための目標値を導出し、導出した目標値をロボット1に出力し、アーム111 ~ 115を動かして合焦状態にする。詳細は後述する。

【0032】

次にPC3は、ローカル座標系Lcの z_{L_c} 軸方向とカメラ2の光軸Lとが平行になるように、カメラ2によって撮像された画像に基づいて、カメラ設定のv成分(y_6 軸周りの回転成分)及びw成分(x_6 軸周りの回転成分)を補正するとともに、ローカル座標系Lcを更新する(S5)。詳細には次の通りである。

【0033】

基準座標系Rbにおいて光軸Lの方向を示す z_{L_c} 軸の方向は、カメラ設定の撮像姿勢(u, v, w)と回転軸部材121 ~ 126の回転角度とに一意に関連づけられているため、カメラ設定として記憶されているカメラ2の撮像姿勢と、第五アーム115に取り付けられているカメラ2の実際の撮像姿勢とが異なっている場合には、ローカル座標系Lcの z_{L_c} 軸方向が実際の光軸Lの方向からずれる。例えばカメラ設定の撮像姿勢が正確でない場合、図9に示すように、ロボットビジョンを用いて光軸Lがマーカーボード4に対して垂直になる状態のTCPの姿勢(z_6 軸の方向)とカメラ設定の撮像姿勢とから導かれるローカル座標系Lcの z_{L_c} 軸方向はマーカーボード4と垂直にならない。マーカーボード4に対して垂直でないローカル座標系Lcの z_{L_c} 軸方向にカメラ2を動かせば、画像の重心に位置するマーカー45も画像座標系Imにおいて動く。

【0034】

そこでまずPC3は、ローカル座標系Lcの z_{L_c} 軸の方向にカメラ2を動かす前後に

においてカメラ 2 によって撮像したそれぞれの画像から中央のマーカ－ 4 5 の中心位置を画像座標系 I_m で検出する。そして P C 3 は、 z_{L_c} 軸の方向にカメラ 2 を動かす前にカメラ 2 によって撮像した画像から検出したマーカ－ 4 5 の中心座標を (u_1, v_1) とし、 z_{L_c} 軸の方向にカメラ 2 を動かした後にカメラ 2 によって撮像した画像から検出したマーカ－ 4 5 の中心座標を (u_2, v_2) として、次式 (1)、(2) で定める傾き指標 H_x 、 H_y を導出する。

$$H_x = (u_1 - u_2) \dots (1)$$

$$H_y = (v_1 - v_2) \dots (2)$$

【0035】

続いて P C 3 は、傾き指標 H_x 、 H_y に基づいて、T C P に固定された x_6 軸と y_6 軸を回転軸とする回転成分 w 、 v についてカメラ設定の撮像姿勢を補正するとともに、補正されたカメラ設定の撮像姿勢と回転軸部材 1 2 1 ~ 1 2 6 の回転角度に基づいてローカル座標系 L_c を更新する。光軸の傾き補正が実行されると、ローカル座標系 L_c の z_{L_c} 軸は光軸 L と平行になる。

【0036】

光軸の傾き補正において、カメラ設定の撮像姿勢を予め決められた角度だけ補正するとともにカメラ 2 を予め決められた角度だけ回転させる度に傾き指標 H_x 、 H_y を導出し、導出した傾き指標 H_x 、 H_y を予め決められた既定値と比較する処理を、傾き指標 H_x 、 H_y が規定値未満になるまで繰り返してもよい。すなわち、カメラ 2 を動かしながら、カメラ設定の撮像姿勢とローカル座標系 L_c を徐々に補正しても良い。また、 z_{L_c} 軸が光軸と平行になる補正量を傾き指標 H_x 、 H_y に基づいて算出しても良い。

【0037】

次に P C 3 は、ローカル座標系 L_c の x_{L_c} 軸方向に T C P を移動させることによって画像の重心に位置するマーカ－ 4 5 が画像座標系 I_m の水平方向にのみ動くように、カメラ設定の撮像姿勢を、J 6 座標系の z_6 軸を回転軸とする回転成分 u について補正する (S 6)。詳細には次の通りである。

【0038】

まず P C 3 は、カメラ 2 によって撮像された画像に基づいて、カメラ 2 の光軸 L がマーカ－ボード 4 と垂直でカメラ 2 から取得する画像の重心 (u_3, v_3) に中央のマーカ－ 4 5 が位置するようにカメラ 2 を移動させる。具体的には、ステップ S 5 で更新されたローカル座標系 L_c の z_{L_c} 軸とカメラ座標系 C_{am} の $z_{c_{am}}$ 軸とを平行に保った状態で、カメラ 2 によって撮像された画像に基づいて、マーカ－ 4 5 の中心が画像の重心に位置するようにカメラ 2 を移動させる。続いて P C 3 は、ステップ S 5 で更新されたローカル座標系 L_c の x_{L_c} 軸方向にカメラ 2 を x だけ移動させる。続いて P C 3 は、カメラ 2 から画像を取得し、取得した画像からマーカ－ 4 5 の中心位置 (u_4, v_4) を検出する。ローカル座標系 L_c の x_{L_c} 軸がカメラ座標系 C_{am} の $x_{c_{am}}$ 軸と平行に設定されていれば、カメラ 2 が x_{L_c} 軸方向に移動しても、画像座標系 I_m においてマーカ－ 4 5 は垂直方向に移動しない。しかし、ローカル座標系 L_c の x_{L_c} 軸がカメラ座標系 C_{am} の $x_{c_{am}}$ 軸と平行に設定されていなければ、T C P が x_{L_c} 軸方向に移動すると、画像座標系 I_m においてマーカ－ 4 5 は、図 10 に示すように画像の重心から垂直方向に移動する。そこでローカル座標系 L_c の x_{L_c} 軸と y_{L_c} 軸とを、 z_{L_c} 軸を中心として回転させる補正角度を次式 (3) で導出し、ローカル座標系 L_c の x_{L_c} 軸と y_{L_c} 軸の方向とカメラ設定の回転成分 u とを補正する。

【数 1】

$$\Delta\theta = \arctan \frac{v_4 - v_3}{u_4 - u_3} \dots (3)$$

【0039】

次に P C 3 は、ローカル座標系 L_c の z_{L_c} 軸と平行な軸周りにカメラ 2 を回転させることによって画像の重心に位置するマーカ－ 4 5 が画像座標系 I_m において動かないようにカメラ設定の x_6 成分及び y_6 成分を補正するとともに、ローカル座標系 L_c を更新す

る (S 7) 。

【 0 0 4 0 】

ここでステップ S 7 の処理を図 1 1 に基づいて詳細に説明する。まず P C 3 は、カメラ 2 によって撮像された画像に基づいて、カメラ 2 の光軸 L がマーカーボード 4 と垂直でカメラ 2 から取得する画像の重心に中央のマーカー 4 5 が位置する初期状態にカメラ 2 を移動させる (S 7 1) 。具体的には、ステップ S 6 で更新されたローカル座標系 L c の z_{L_c} 軸とカメラ座標系 C a m の $z_{c a m}$ 軸とが平行になり、マーカー 4 5 の中心が画像の重心に位置するようにカメラ 2 を移動させる。

【 0 0 4 1 】

続いて P C 3 は基準座標系 R b におけるローカル座標系 L c の原点の座標を移動後の T C P の位置とカメラ設定に基づいて更新する (S 7 2) 。この時点において、カメラ設定の x y 成分は補正されていないため、実際のカメラ 2 の撮像位置とは異なる座標にローカル座標系 L c の原点が設定される。

【 0 0 4 2 】

続いて P C 3 は、ローカル座標系 L c の z_{L_c} 軸を回転軸としてカメラ 2 を規定角度 (例えば 3 0 度) だけ回転させる (S 7 3) 。ローカル座標系 L c の原点は実際のカメラ 2 の撮像位置とは異なっているため、マーカー 4 5 の中心を通らない回転軸の周りをカメラ 2 が回転することになる。

【 0 0 4 3 】

続いて P C 3 は、回転後のカメラ 2 から画像を取得し、取得した画像から中央のマーカー 4 5 の中心位置を検出する (S 7 4) 。回転軸がマーカー 4 5 の中心を通っていないため、回転後のマーカー 4 5 の中心位置は回転前とは異なった位置で検出される。

【 0 0 4 4 】

続いて P C 3 は、規定回数だけステップ S 7 3 でカメラ 2 を回転させたか否か判定する (S 7 5) 。規定回数だけステップ S 7 3 でカメラ 2 を回転させていなければ、P C 3 はステップ S 7 3 から処理を繰り返す。ステップ S 7 3 、 7 4 の処理が繰り返されると、マーカー 4 5 の中心の軌跡は図 1 2 に示すように円弧を描く。

【 0 0 4 5 】

規定回数だけステップ S 7 3 でカメラ 2 を回転させていれば、P C 3 はマーカー 4 5 の中心が描いた円弧の中心 O (u_7, v_7) を画像座標系 I m で導出する (S 7 6) 。

【 0 0 4 6 】

続いて P C 3 は、画像座標系 I m で導出した円弧の中心 O に対応する点がローカル座標系 L c の原点となるように基準座標系 R b においてローカル座標系 L c を $x_{L_c} y_{L_c}$ 平面と平行に移動させて更新するとともに、更新されたローカル座標系 L c と基準座標系 R b の対応関係に基づいてカメラ設定の x_6 成分及び y_6 成分を補正する (S 7 7) 。ローカル座標系が確定しておらず画像座標系 I m と基準座標系 R b が校正されていないこの段階では、ローカル座標系 L c または基準座標系 R b と画像座標系 I m との対応関係は定まっていない。そこで P C 3 は、ステップ S 7 6 で求めた円弧の中心 O にマーカー 4 5 が位置するようにカメラ 2 を並進させ、座像座標系 I m において検出するマーカー 4 5 の移動前後の座標と、基準座標系 R b の移動前後の撮像位置 (T C P とカメラ設定によって定まる撮像位置) とに基づいて画像座標系 I m とステップ S 7 2 で設定したローカル座標系 L c との対応関係を導出する。続いて P C 3 は、導出した対応関係に基づいて画像座標系 I m における円弧の中心 O の座標をステップ S 7 2 で設定したローカル座標系 L c の座標に変換する。続いて P C 3 は、ステップ S 7 2 で設定したローカル座標系 L c における円弧の中心 O の座標を基準座標系 R b に変換し、円弧の中心 O を原点とする新たなローカル座標系 L c を導出する。その結果、ステップ S 7 2 で設定したローカル座標系 L c は $x_{L_c} y_{L_c}$ 平面と平行に移動する。また基準座標系 R b に変換された円弧の中心 O の x_{r_b}, y_{r_b} 座標は、実際のカメラ 2 の撮像位置の x_{r_b}, y_{r_b} 座標と一致する。そこで P C 3 は、円弧の中心 O の x_{r_b}, y_{r_b} 座標と T C P の位置座標とに基づいてカメラ設定の x_6 成分及び y_6 成分を補正する。

10

20

30

40

50

【 0 0 4 7 】

次に P C 3 は、カメラ 2 によって撮像された画像に基づいて、カメラ設定の z_6 成分を補正するとともに、ローカル座標系 L_c を更新する (S 8)。詳細は次の通りである。

【 0 0 4 8 】

まず P C 3 は、カメラ 2 によって撮像された画像に基づいて、カメラ 2 の光軸 L がマーカボード 4 と垂直でカメラ 2 から取得する画像の重心に中央のマーカ 4 5 が位置する初期状態にカメラ 2 を移動させる。具体的には、ステップ S 7 で更新されたローカル座標系 L_c の z_{L_c} 軸とカメラ座標系 C_{am} の $z_{c_{am}}$ 軸とが平行になり、マーカ 4 5 の中心が画像の重心に位置するようにカメラ 2 を移動させる。

【 0 0 4 9 】

続いて P C 3 は、基準座標系 R_b におけるローカル座標系 L_c の原点の座標を移動後の T C P の位置とカメラ設定に基づいて更新する。この時点において、カメラ設定の z_6 成分は補正されていないため、実際のカメラ 2 の撮像位置とは異なる座標にローカル座標系 L_c の原点が設定される。

【 0 0 5 0 】

続いて P C 3 は、初期状態でカメラ 2 から画像を取得してマーカ 4 1 ~ 4 9 の位置を画像座標系 I_m で検出し、検出したマーカ 4 1 ~ 4 9 の位置とマーカ座標系 C_b におけるマーカ 4 1 ~ 4 9 の位置とに基づいてマーカボード 4 から撮像位置までの距離 H を導出する。ここで画像座標系 I_m における距離とマーカ座標系 C_b における距離との関係は、マーカボード 4 から撮像位置までの距離 H と線形に対応する。したがって P C 3 は、画像座標系 I_m におけるマーカ 4 1 ~ 4 9 の位置から算定されるマーカ間距離と、マーカ座標系 C_b におけるマーカ 4 1 ~ 4 9 の位置から算定されるマーカ間距離とにもとづいて距離 H を導出する。

【 0 0 5 1 】

続いて P C 3 は、図 1 3 に示すように、撮像位置を変えずにカメラ 2 を $x_{c_{am}}$ 軸または $y_{c_{am}}$ 軸の周りに規定角度 だけ回転させた後に、カメラ 2 から画像を取得してマーカ 4 5 の中心位置を検出しながら、再びマーカ 4 5 が画像の重心に位置するまでカメラ 2 をローカル座標系 L_c の $x_{L_c} y_{L_c}$ 平面に対して平行に移動させ、T C P の移動距離 D を計測する。なお、この時点においてカメラ座標系 C_{am} の $x_{c_{am}}$ 軸はローカル座標系 L_c の x_{L_c} 軸と平行で、カメラ座標系 C_{am} の $y_{c_{am}}$ 軸はローカル座標系 L_c の y_{L_c} 軸と平行である。

【 0 0 5 2 】

カメラ設定の z_6 成分が実際の撮像位置に対して正確に設定されていれば、計測される T C P の移動距離とカメラ設定から導出されるカメラ 2 の移動距離 D と実際のカメラ 2 の移動距離 D' とは等しくなる。しかしこの時点においては、カメラ設定の z_6 成分が実際の撮像位置に対して正確に設定されていないため、T C P の位置とカメラ設定から導かれる撮像位置は実際の撮像位置から z_{L_c} 方向 (マーカボード 4 に対して垂直な方向) にずれている。このため、図 1 3 に示すように実際のカメラ 2 の移動距離 D' と T C P の位置とカメラ設定から導かれる移動距離 D とは等しくならない。距離 H と角度 と距離 D とカメラ設定の z_6 成分の誤差 z の関係は、次式 (4) によって表される。

$$(H + z) \tan \theta = D \dots (4)$$

【 0 0 5 3 】

そこで P C 3 は、次式 (5) によって z を導出してカメラ設定の z_6 成分を補正して確定させるとともに、回転軸部材 1 2 1 ~ 1 2 6 の回転角度から導かれる現在の T C P の位置と補正後のカメラ設定とに基づいてローカル座標系 L_c を更新する。

【 数 2 】

$$\Delta z = \frac{\Delta D}{\tan \theta} - H \dots (5)$$

【 0 0 5 4 】

更新されたローカル座標系 L_c は、実際のカメラ 2 の撮像位置を原点とし、カメラ 2 の

光軸 L と平行な z_{Lc} 軸と、イメージセンサー 202 の水平方向と平行な x_{Lc} 軸とし、イメージセンサー 202 の垂直方向と平行な y_{Lc} 軸とを有する座標系になる。また確定したカメラ設定は、カメラ 2 の撮像位置と撮像姿勢と正確に対応する。

【0055】

3. 光軸傾き補正

次に図 5 を参照しながら光軸傾き補正の詳細を説明する。光軸傾き補正では、姿勢と位置が未知のマーカーボード 4 を基準として実際のカメラ 2 の撮像位置と撮像方向が補正される。具体的には、マーカーボード 4 に固定された座標系 Cb に対するカメラ 2 の撮像位置と撮像姿勢を導出し、マーカー座標系 Cb の z_{cb} 軸がカメラ 2 の光軸 L と平行になるようにカメラ 2 の姿勢を変化させる。

【0056】

まず目標値導出部 32 は、画像取得部 31 を介してカメラ 2 から画像を取得し、画像を解析することによりマーカー 41 ~ 49 の中心位置を検出する (S21)。すなわち、目標値導出部 32 は、作業平面に含まれる 9 つの基準点の位置を画像座標系において検出する。

【0057】

続いて目標値導出部 32 は、マーカー座標系 Cb において予め決められているマーカーボード 4 上の各マーカー 41 ~ 49 の中心位置と、画像座標系 Im において検出したマーカー 41 ~ 49 の中心位置とに基づいて、マーカー座標系 Cb におけるカメラ 2 の姿勢を示す姿勢行列 C を導出する (S22)。式 (6) に示す姿勢行列 C において、 (a_{11}, a_{21}, a_{31}) はマーカー座標系 Cb における x_{cam} 軸の方向を表すベクトル C_x であり、 (a_{12}, a_{22}, a_{32}) はマーカー座標系 Cb における y_{cam} 軸の方向を表すベクトル C_y であり、 (a_{13}, a_{23}, a_{33}) はマーカー座標系 Cb における光軸 L の方向を表すベクトル C_z である。

【数 3】

$$C = \begin{pmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} \end{pmatrix} \cdots (6)$$

【0058】

次に、目標値導出部 32 は、カメラ 2 の姿勢行列 C に基づいて、光軸 L の傾き指標 x 、 y 、 z を導出する (S23)。 x は、 x_{cam} 軸と x_{cb} 軸とがなす角度である。 y は、 y_{cam} 軸と y_{cb} 軸とがなす角度である。 z は、光軸 L と z_{cb} 軸とがなす角度である。マーカー座標系 Cb において、 x_{cb} 軸の方向を示すベクトル X は $(1, 0, 0)$ 、 y_{cb} 軸の方向を示すベクトル Y は $(0, 1, 0)$ 、 z_{cb} 軸の方向を示すベクトル Z は $(0, 0, 1)$ である。

$$C_x \cdot X = |C_x| \cos x = a_{11} \cdots (7)$$

$$C_y \cdot Y = |C_y| \cos y = a_{22} \cdots (8)$$

$$C_z \cdot Z = |C_z| \cos z = a_{33} \cdots (9)$$

であるから、目標値導出部 32 は、次式 (10)、(11)、(12) を用いて傾き指標 x 、 y 、 z を導出する

$$x = \arccos(a_{11} / |C_x|) \cdots (10)$$

$$y = \arccos(a_{22} / |C_y|) \cdots (11)$$

$$z = \arccos(a_{33} / |C_z|) \cdots (12)$$

【0059】

続いて目標値導出部 32 は、傾き指標 x 、 y 、 z が全て規定値以下であるか否かを判定する (ステップ S24)。既定値は例えば 0.5 度とする。傾き指標 x 、 y 、 z が全て規定値以下になると、光軸傾き補正を終了する。

【0060】

傾き指標 x 、 y 、 z が全て規定値以下でない場合、目標値導出部 32 は、ステッ

10

20

30

40

50

ブ S 2 3 で導出した傾き指標に基づいて、カメラ 2 の光軸 L に対してマーカボード 4 が垂直になり、かつ、光軸 L が中央のマーカ 4 5 の中心を通る位置と姿勢にカメラ 2 を動かすための目標値を導出する。導出された目標値は、出力部 3 3 によってロボット 1 の制御部 1 4 に出力される。その結果、アーム 1 1 1 ~ 1 1 5 が動く (S 2 5)。

【 0 0 6 1 】

目標値を出力部 3 3 がロボット 1 に出力してアーム 1 1 1 ~ 1 1 5 が動いて停止すると、画像取得部 3 1 がカメラ 2 から画像を取得し、画像に基づいて目標値導出部 3 2 が傾き指標を導出して評価する上述のステップ S 2 1 からステップ S 2 4 の処理が繰り返される。

【 0 0 6 2 】

4 . 焦点調整

次に図 6 を参照しながら焦点調整の詳細を説明する。焦点調整では、図 7 に示すようにカメラ 2 の光軸 L と平行な方向に T C P を移動させながら画像に写るマーカ 4 1 ~ 4 9 のシャープネスが最大になる合焦状態が探索される。

【 0 0 6 3 】

はじめに目標値導出部 3 2 は現在の T C P の位置と姿勢を保存する (S 3 1)。すなわち、ステップ S 2 の傾き補正が終了した時点における T C P の位置と姿勢が保存される。

【 0 0 6 4 】

次に、目標値導出部 3 2 は、マーカ座標系 C b でのマーカ 4 1 ~ 4 9 の各重心の座標と、画像座標系でのマーカ 4 1 ~ 4 9 の各重心の座標とに基づいて、カメラ 2 からマーカボード 4 までの距離とを導出する (S 3 2)。

【 0 0 6 5 】

続いて目標値導出部 3 2 は、カメラ 2 から取得した画像に基づいてカメラ 2 の合焦指標を導出する (S 3 4)。合焦指標としては、マーカ 4 1 ~ 4 9 が写る領域の微分積算値 (シャープネス) を一定面積で標準化した値を用いることができる。合焦指標を導出する対象領域は、図 8 A および図 8 B の点線で囲んだ領域のように全てのマーカ 4 1 ~ 4 9 が内側に収まる最小の矩形領域に設定される。すなわち、カメラ 2 によってマーカ 4 1 ~ 4 9 が撮像された画像から切り出された部分画像に基づいて合焦指標が導出される。

【 0 0 6 6 】

続いて目標値導出部 3 2 は、焦点調整においてカメラ 2 が撮像した回数が規定回数に達したか否かを判定する (S 3 5)。

【 0 0 6 7 】

焦点調整においてカメラ 2 が撮像した回数が規定回数に達していない場合、目標値導出部 3 2 はカメラ 2 の光軸 L と平行でマーカボード 4 に接近または離間する方向に所定距離だけ T C P を移動させる (S 3 6)。

【 0 0 6 8 】

T C P を移動させると、画像取得部 3 1 はカメラ 2 から画像を取得し (S 3 7)、ステップ S 3 3 から処理が繰り返される。すなわち、撮像回数が規定回数に達するまで、撮像位置を変えながらカメラ 2 による撮像が行われ、撮像された画像毎に合焦指標が導出される。マーカボード 4 に接近するほど、マーカ 4 1 ~ 4 9 が写る領域は大きくなり、やがてマーカ 4 1 ~ 4 9 は図 8 C に示すように画像に収まらなくなる。そこで合焦指標を導出する対象領域は、カメラ 2 がマーカボード 4 に接近するほど大きく設定され、マーカ 4 1 ~ 4 9 が写る領域が画像の端に接した後に画像全体になる。このようにして設定される領域について合焦指標が導出されると、合焦指標がシャープネスであれば、通常は、徐々に大きくなった後に徐々に小さくなる。

【 0 0 6 9 】

焦点調整においてカメラ 2 が撮像した回数が規定回数に達すると、目標値導出部 3 2 は、合焦状態にするための目標値を合焦指標に基づいて導出し、出力部 3 3 は導出された目標値をロボット 1 に出力する (S 3 8)。具体的には例えば、ステップ S 3 4 で導出される複数の合焦指標のうち最大の合焦指標が得られた位置に T C P を移動させるための目標

10

20

30

40

50

値が導出される。導出された目標値がロボット 1 に出力されると、マーカーボード 4 はカメラ 2 に対して合焦状態になる。

【0070】

5. ローカル座標系の自動設定と自動校正

作業平面を示すローカル座標系を設定したり、基準座標系 R_b と画像座標系 I_m とを校正するためには、従来であれば、作業平面に対してカメラ 2 の光軸 L を正確に垂直な状態にセットしたり、 J_6 軸が作業平面に対して垂直な姿勢で作業平面をタッチアップして作業平面の位置と姿勢を正確に教示したりといった緻密な準備が必要であった。作業平面が水平でない場合には、作業平面をタッチアップする操作の難易度が上がる。そして、これらの準備が不正確である場合には校正が失敗する。またオペレーターは校正の失敗を知ることによって、校正の準備が不正確であったことを知る。したがって、従来は校正とローカル座標系の設定に多大な時間を要していた。

10

【0071】

ローカル座標系の自動設定と自動校正では、校正が行われていない状態でのロボットビジョン（カメラ 2 によって撮像される画像）を用いて校正とローカル座標系の設定を自動で行う。自動で行われる校正の準備には、作業平面を示すマーカーボード 4 に対してカメラ 2 の光軸が垂直であって、カメラ 2 がマーカーボード 4 に合焦している状態にする自動制御を含む。このため、マーカーボード 4 とカメラ 2 との正確な位置関係が定まっていない状態で開始指示を入力するだけで、基準座標系 R_b と画像座標系 I_m とを、極めて容易に校正することができる。そして校正の準備が完了している状態で、ローカル座標系 L_c を設定することにより、作業平面を基準としてロボット 1 を制御することが容易になる。

20

【0072】

以下、ローカル座標系の自動設定と自動校正について図 14 を参照しながら説明する。ローカル座標系の自動設定と自動校正は、オペレーターが開始指示を PC 3 に入力することによって起動する。（S 11）それ以後、オペレーターに一切の操作を要求することなく完了してもよい。開始指示は、ローカル座標系の自動設定と自動校正を開始するためのトリガーである。従って、ロボット 1 を操作するための目標値を含んでいなくてもよい。開始指示を入力する前にオペレーターに求められるのは、カメラ設定を PC 3 に設定することと、マーカーボード 4 を作業平面に設置することと、カメラ 2 によってマーカーボード 4 をだいたい正面から撮像できる状態に TCP を移動させるジョグ送り操作だけであってもよい。

30

【0073】

開始指示が PC 3 に入力されると、PC 3 は、カメラ 2 の光軸 L をマーカーボード 4 に対して垂直にする光軸傾き補正を実行する（S 12）。次に PC 3 は、焦点調整を実行する（S 14）。次に PC 3 は、再び光軸傾き補正を実行する。ここで実行される光軸傾き補正および焦点調整は、自動カメラ設定において述べた光軸傾き補正（S 2）および焦点調整（S 4）と同一である。2 度目の光軸傾き補正が実行されると、カメラ 2 の光軸 L がマーカーボード 4 に対して正確に垂直になる。

【0074】

次に PC 3 はローカル座標系の設定を実行する（S 16）。詳細にはまず PC 3 は、カメラ 2 によって撮像された画像に基づいて、カメラ 2 の光軸 L がマーカーボード 4 と垂直でカメラ 2 から取得する画像の重心に中央のマーカー 45 が位置するようにカメラ 2 を移動させる。具体的には、光軸傾き補正が実行された状態から、マーカー 45 の中心が画像の重心に位置するようにカメラ 2 の撮像位置を並進させる。続いて PC 3 は、TCP の位置と姿勢とカメラ設定とに基づいてローカル座標系 L_c を設定する。カメラ設定が正確であるため、実際のカメラ 2 の撮像位置を原点とし、マーカーボード 4 に対して垂直な z_{L_c} 軸と、イメージセンサー 202 の水平方向と平行な x_{L_c} 軸と、イメージセンサー 202 の垂直方向と平行な y_{L_c} 軸とを有するローカル座標系 L_c が設定される。

40

【0075】

次に PC 3 は 9 点校正を実施する（ステップ S 17）。この時点においてローカル座標

50

系の x_{Lc} y_{Lc} 平面はマーカーボード 4 に対して平行になっている。このことは、画像から検出するマーカー 4 1 ~ 4 9 の位置に基づいて、ローカル座標系 Lc と作業平面を表す画像座標系 Im を校正できること、および基準座標系 Rb と画像座標系 Im を構成できることを意味する。

【0076】

具体的には、校正部 3 4 は、ローカル座標系 Lc が設定された状態（原点に撮像位置を位置づけ、ローカル座標系とカメラ座標系の $x y z$ 軸をそれぞれ互いに平行にした状態）でカメラ 2 から画像を取得して各マーカー 4 1 ~ 4 9 の画像座標系 Im における位置を検出して記憶する。次に校正部 3 4 は、検出した各マーカー 4 1 ~ 4 9 の中心座標を画像座標系 Im からローカル座標系 Lc に変換し、各マーカー 4 1 ~ 4 9 の中心が画像の重心に位置するようにカメラ 2 の撮像位置を並進させる。続いて校正部 3 4 は、画像座標系 Im において検出した各マーカー 4 1 ~ 4 9 の中心座標と、各マーカー 4 1 ~ 4 9 の中心が画像の重心に位置するカメラ 2 の撮像位置とに基づいて、ローカル座標系 Lc と画像座標系 Im とを校正する。すなわち、ローカル座標系 Lc と画像座標系 Im との非線形な対応関係を示すパラメーターが、9 つのマーカー 4 1 ~ 4 9 から x_{Lc} y_{Lc} 平面に下ろした垂線と x_{Lc} y_{Lc} 平面との交点を示すローカル座標系 Lc の座標（撮像位置の座標）と、中央のマーカー 4 5 が画像の重心に位置する画像座標系 Im から検出される 9 つのマーカー 4 1 ~ 4 9 の中心座標とを用いて導出される。ここでは、作業平面上の任意の点について、レンズ 2 0 1 の歪みも加味して、正確にローカル座標系 Lc と画像座標系 Im とを校正する。なお、このような非線形変換に用いるパラメーターを導出するために用いる基準点の数が多いほど校正の精度は高くなる。すなわち基準点を示すマーカーの数が多いほど校正の精度は高くなる。ローカル座標系 Lc と基準座標系 Rb との対応関係は既に決められているため、基準座標系 Rb と画像座標系 Im とは、ローカル座標系 Lc と画像座標系 Im とを校正する際に校正しても良いし、校正しなくても良い。またローカル座標系 Lc と画像座標系 Im とを校正せずに、基準座標系 Rb と画像座標系 Im とを校正しても良い。

【0077】

6. 目標設定

作業平面に対してローカル座標系 Lc が設定され、ローカル座標系 Lc または基準座標系 Rb と、画像座標系 Im とが校正された状態では、作業平面が水平でなくても、作業平面上の任意の点をロボット 1 に容易に教示することができる。以下、作業平面上の任意の点をロボット 1 に教示する目標設定について図 1 5 を参照しながら説明する。作業平面に対してローカル座標系 Lc の自動設定と自動校正が実行された状態では、作業平面上の任意の点と画像座標系 Im の任意の点との対応関係が明らかになっているため、目標設定は、作業平面からマーカーボード 4 を除去した状態で実行可能である。

【0078】

まず $PC3$ は、作業平面の画像をカメラ 2 から取得して画面に表示する（ $S21$ ）。具体的には、 $PC3$ はローカル座標系 Lc の原点に撮像位置を設定し、ローカル座標系 Lc の x_{Lc} 軸、 y_{Lc} 軸、 z_{Lc} 軸がそれぞれカメラ座標系 Cam の x_{cam} 軸、 y_{cam} 軸、 z_{cam} 軸と平行になる撮像姿勢を設定してカメラ 2 に撮像を指示することによってカメラ 2 から画像を取得し、取得した画像を表示部 3 5 の画面に表示する。

【0079】

次に $PC3$ は、 TCP やツールの先端などの制御対象点を制御するための制御パラメーターを画像座標系 Im を介して取得する（ $S22$ ）。具体的には例えば指示受付部 3 0（制御パラメーター取得部）は、表示した画像の任意の点に対するクリック、タップ等の操作を、制御対象点を移動させる目標点の位置の指定として受け付ける。すなわち $PC3$ は、制御パラメーターとしての目標点の座標を画像座標系 Im を介して取得する。このとき $PC3$ は、目標点の指定と対応付けて目標姿勢の指定を受け付けても良い。例えば指定された目標点に対して、数値の直接入力やスライダーの操作等によって目標姿勢を指定できるようにしてもよい。目標姿勢は、制御対象点の姿勢を定める座標系の少なくとも 1 軸の

方向をローカル座標系 L_c において指定することによって指定可能である。そしてこのような目標姿勢の指定がなされない場合には、あらかじめ決められた姿勢を目標姿勢とみなせばよい。例えば制御対象点が TCP に装着されるドリルビットの先端である場合、ドリルビットの回転軸が作業平面に対して垂直になる姿勢、すなわちドリルビットの回転軸がローカル座標系 L_c の z_{L_c} 軸に平行な姿勢を目標姿勢とみなせばよい。

【0080】

次に PC3 は、目標点の座標をローカル座標系 L_c に変換する (S23)。すなわち PC3 は、画面表示した画像内の任意の点がローカル座標系 L_c の特定の点に対応するものとしてステップ S22 において制御パラメータを取得している。したがってここでローカル座標系 L_c を介して制御パラメータとしての目標点の位置と目標姿勢が PC3 に取得される。座標変換には、自動校正によって求められたパラメータが用いられる。

10

【0081】

次に PC3 は、ローカル座標系 L_c に変換された制御パラメータを用いて制御対象点を制御する (S24)。このとき、制御パラメータは、PC3 によって、基準座標系 R_b において位置を示す座標と、基準座標系 R_b において姿勢を示す行列または角度とに変換されてロボット 1 に出力された後に、ロボット 1 の制御部 14 によって回転軸部材 121 ~ 126 を駆動するモーター 131 ~ 136 の回転角度に変換される。制御部 14 は、モーター 131 ~ 136 を回転させることによって TCP を作業平面上の目標点に目標姿勢で移動させる。

【0082】

20

なお、実際には、制御パラメータの入力を受け付けた後に実行開始のコマンド入力をユーザーに求めるなど、制御パラメータの入力操作が終了したことを PC3 に通知する必要がある。例えば、実行開始のボタンを画面表示しておき、当該ボタンがクリックされた場合に、ステップ S23 の処理を開始すればよい。なお、複数の目標点の設定を一度に受け付けることも可能である。

【0083】

制御対象点を移動させる場合に、始点から目標点までの経路をどのように定めても良いが、例えば、作業平面に対して平行な方向への移動モードと、作業平面に対して垂直な方向への移動モードを、モードの切換え数が最小になるように組み合わせればよい。このように作業平面に対して平行な方向への移動と、作業平面に対して垂直な方向への移動を組み合わせる制御対象点を移動させる場合、ローカル座標系 L_c を介して制御パラメータを取得するため、移動方向の計算アルゴリズムの設計が容易である。またこの場合、制御対象点の移動経路をユーザーが容易に予測できる。

30

【0084】

また、制御対象点がツールに設定されている場合、PC3 は、ツールの先端等の制御対象点の目標点と目標姿勢を、画像座標系 I_m を介して取得する。この場合、TCP に対するツールのオフセットを予め設定しておく必要がある。ツールの先端等の制御対象点を制御するために、PC3 は、ユーザーによって設定される制御対象点の目標点の座標を、オフセットを用いて基準座標系 R_b における TCP の座標に変換し、ユーザーによって設定される制御対象点の目標姿勢を、オフセットを用いて基準座標系 R_b における TCP の目標姿勢に変換する処理を実行してロボット 1 に出力する。ロボット 1 の制御部 14 は基準座標系 R_b の座標と姿勢行列または角度に基づいて、回転軸部材 121 ~ 126 を駆動するモーター 131 ~ 136 の回転角度を導出する。

40

【0085】

以上述べた目標設定では、ユーザーは、作業平面が水平でなくても、画像内の点を指定するだけで作業平面内の目標点を容易に指定することが可能である。そしてカメラ 2 が撮像した画像によって作業平面が表されているため、ユーザーは現実の作業平面の任意の点と画面表示された画像内の点とを容易に対応付けて認識することができる。

【0086】

また目標姿勢の指定を受け付ける場合には、作業平面に対して平行な x_{L_c} y_{L_c} 平面

50

を有するローカル座標系 L_c を介して目標姿勢を取得するため、作業平面が水平でなくても、 $x_{L_c} y_{L_c}$ 平面と平行な作業平面を垂直方向からカメラ 2 で撮像した画像を見ながら目標姿勢を指定するユーザーにとって、現実の作業平面に対する目標姿勢と対応付けて容易に目標姿勢を指定することができる。

【0087】

7. 他の実施形態

上記実施例では、カメラ 2 をロボット 1 のアームに取り付ける構成について説明した。カメラ 2 をロボット 1 のアームに取り付ける構成では、作業平面に対する任意の位置にカメラ 2 を移動させてローカル座標系を設定し、設定したローカル座標系を基準にしてロボット 1 を操作することができる。すなわち、カメラ 2 をロボット 1 のアームに取り付ける構成では、作業平面に対して撮像位置毎にローカル座標系を設定することができる。

【0088】

本発明は、カメラ 2 が作業台、壁、床、天井等に設置されるロボットシステムにも適用できる。カメラ 2 が作業台、壁、床、天井等に設置される構成では、作業平面が設定されてしまえば、カメラ 2 と作業平面の位置関係は不変になるため、作業平面に対してローカル座標系が 1 つ設定される。

【0089】

図 16 に示すようにカメラ 2 が作業台 9 に設置されている場合、マーカーボードを用いずに作業平面を設定し、設定した作業平面に対してローカル座標系を自動設定して自動校正することもできる。以下、カメラ 2 が作業台 9 に設置される場合に、マーカーボードを用いずに作業平面を設定し、ローカル座標系の自動設定と自動校正を実行する方法について説明する。マーカーボードを用いない場合には、作業平面上の複数の基準点をロボット 1 のマニピュレーターで指し示せばよい。具体的には、基準点を指し示すためのマーカーとしてツールチャック 1261 を用いる。このため、図 2A に示すツールチャック 1261 の端面を画像認識するためのテンプレートを PC 3 に予め記憶しておく。

【0090】

作業平面を設定するにあたり、PC 3 は、作業平面に対して J 6 軸が垂直な姿勢で作業平面上の複数の基準点のそれぞれにツールチャック 1261 の TCP を移動させる。ここでは図 17 に示すように作業平面 WS に対して基準点 P1 ~ P9 が設定されるものとする。そして、PC 3 は、各基準点に TCP が位置する状態で撮像された画像をカメラ 2 から取得し、画像座標系 I_m において基準点 P1 ~ P9 の位置を検出する。

【0091】

ここでカメラ 2 によって撮像される画像について図 18 を用いて説明する。9 つの基準点 P1 ~ P9 にマーカーとしての TCP を移動させる毎にカメラ 2 によってツールチャック 1261 を撮像すると、カメラ 2 から取得する各画像におけるツールチャック 1261 の位置は、基準点 P1 ~ P9 の位置に応じて異なることになる。基準座標系 R_b で作業平面内に設定された各基準点に TCP を動かして、それぞれの基準点における TCP を基準座標系 R_b において固定されたカメラ 2 で撮像した n 個の画像から得られる基準点の位置情報は、 n 個の基準点を示すマーカーが付されているマーカーボードを特定の位置と姿勢に保持し、その状態でマーカーを撮像した 1 つの画像から得られる基準点の情報とほぼ同じである。前者の情報には、厳密な基準座標系と画像座標系の対応関係が反映され、後者の情報には、基準座標系とマーカー座標系を合成した座標系と画像座標系の対応関係が反映される。基準座標系とマーカー座標系が厳密な線形な関係にあるとは限らないため、厳密に基準座標系と画像座標系を校正するには、前者の情報を用いることが好ましい。

【0092】

作業平面にマーカーボードを設置してマーカーの位置を画像座標系 I_m において検出するかわりに、作業平面にマーカーを移動させて基準点 P1 ~ P9 の位置を画像座標系 I_m において検出すれば、既に説明した自動カメラ設定、自動校正、目標設定のいずれも同様に実施することができる。ただし、基準点によって作業平面を定めることになるため、作業平面を示すローカル座標系 L_c はカメラ 2 によって撮像する画像に基づいて設定するの

ではなく、予め決めておくことになる。したがってTCP等のマーカーを移動させる際には、予め決められたローカル座標系 L_c を介してマーカーを制御することになる。

【0093】

ここまでローカル座標系 L_c の $x_{L_c}y_{L_c}$ 平面上の点を作業平面上の点に対応付けてきたが、ローカル座標系 L_c の $x_{L_c}y_{L_c}$ 平面上の点を作業平面と平行で作業平面から離れた平面上の点に対応付けても良い。例えばこれまで説明したとおりにマーカーボードを作業平面に設置してローカル座標系 L_c を設定した後に、ローカル座標系 L_c の原点を z_{L_c} 軸方向に移動させてローカル座標系 L_c を更新しても良い。

【0094】

なお、作業面からローカル座標系 L_c の $x_{L_c}y_{L_c}$ 平面までの距離は、マーカー座標系において間隔が既知の2つ以上のマーカーを画像座標系 I_m において検出し、マーカー座標系におけるマーカー同士の間隔と画像座標系 I_m におけるマーカー同士の間隔とに基づいて導出しても良いし、TCPやツールで作業平面をタッチアップする過程でTCPの移動距離を計測して作業面からローカル座標系 L_c の $x_{L_c}y_{L_c}$ 平面までの距離を導出しても良い。

【符号の説明】

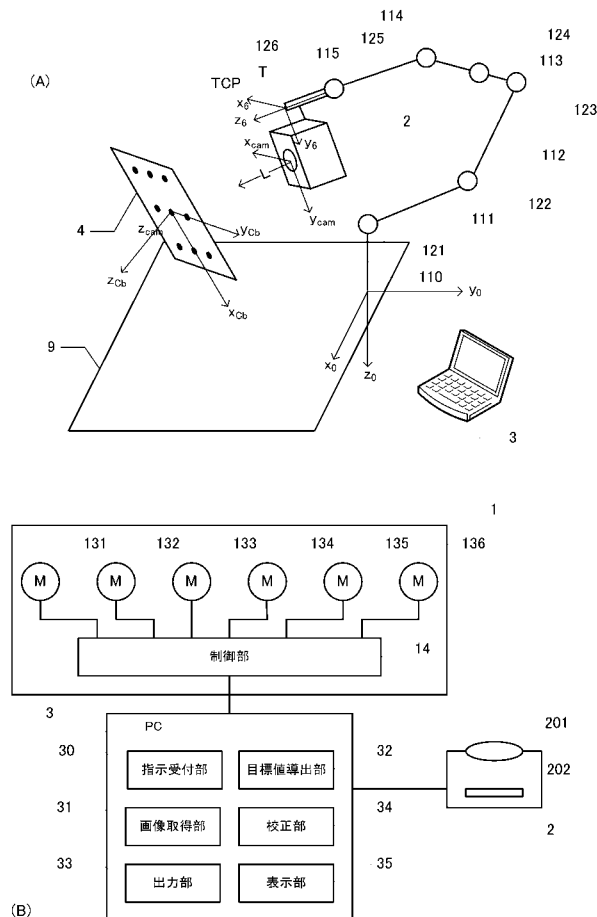
【0095】

4 1 - 4 9 ... マーカー、1 2 1 - 1 2 6 ... 回転軸部材、1 3 1 - 1 3 6 ... モーター、1 1 1 - 1 1 5 ... アーム、1 2 1 - 1 2 6 ... 回転軸部材、1 ... ロボット、2 ... カメラ、3 ... PC、4 ... マーカーボード、9 ... 作業台、1 4 ... 制御部、3 0 ... 指示受付部、3 1 ... 画像取得部、3 2 ... 目標値導出部、3 3 ... 出力部、3 4 ... 校正部、3 5 ... 表示部、1 1 0 ... 基台、1 1 1 ... 第一アーム、1 1 2 ... 第二アーム、1 1 3 ... 第三アーム、1 1 4 ... 第四アーム、1 1 5 ... 第五アーム、2 0 1 ... レンズ、2 0 2 ... イメージセンサー、1 2 6 1 ... ツールチャック、L ... 光軸、T ... ツール、T J ... 軸部、W S ... 作業平面

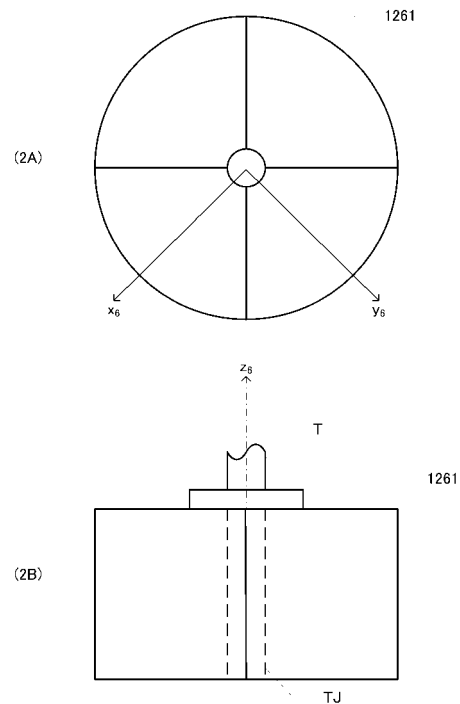
10

20

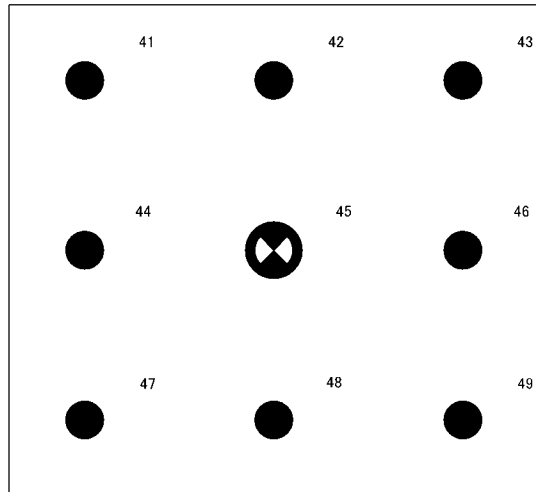
【図 1】



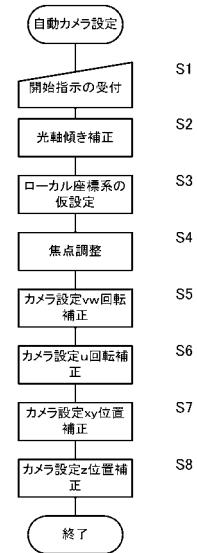
【図 2】



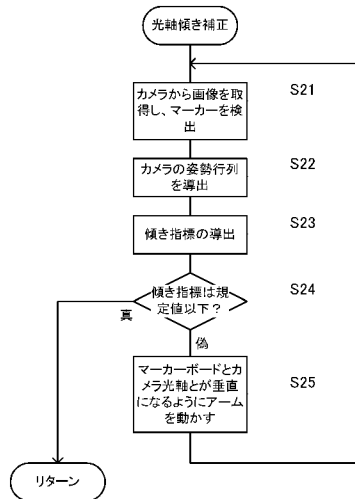
【図 3】



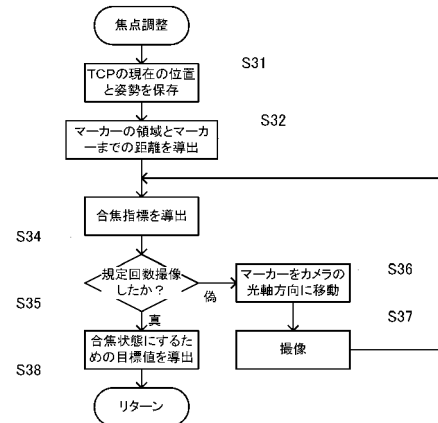
【図 4】



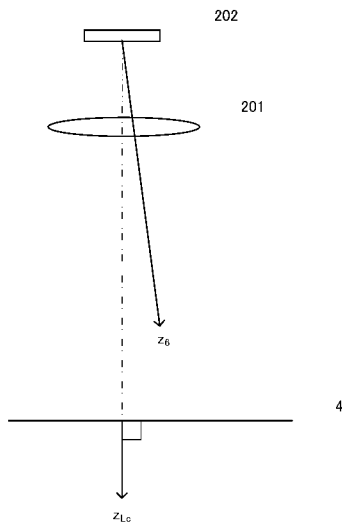
【図 5】



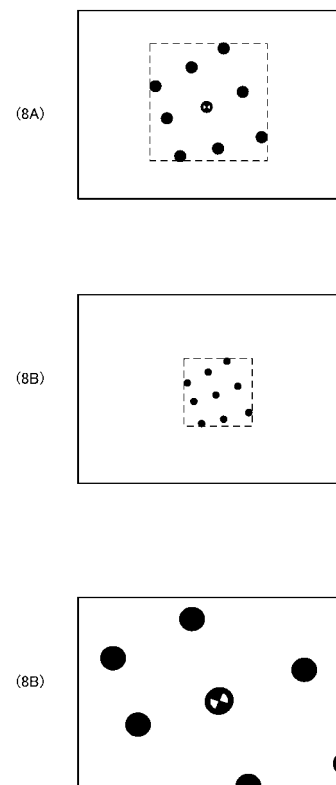
【図 6】



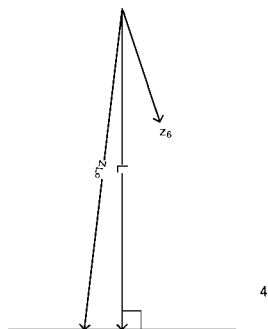
【図 7】



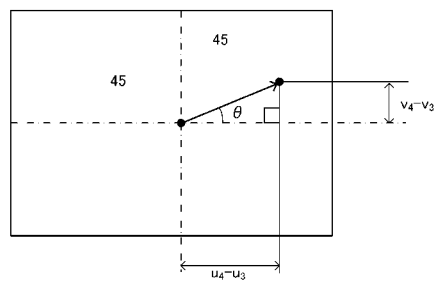
【図 8】



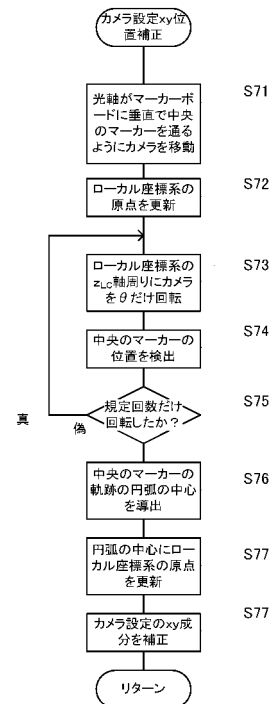
【図 9】



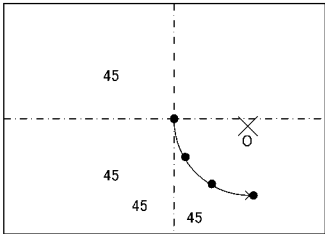
【図 10】



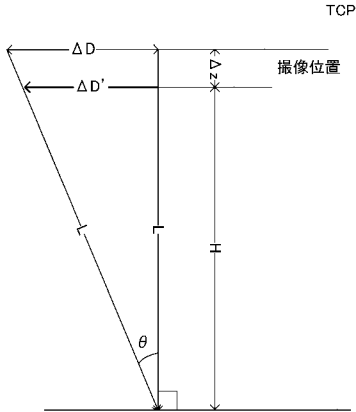
【図 11】



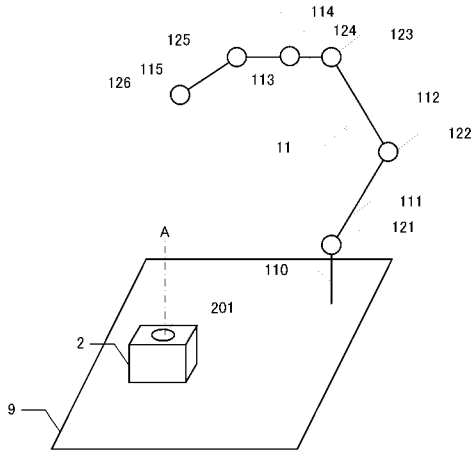
【図 1 2】



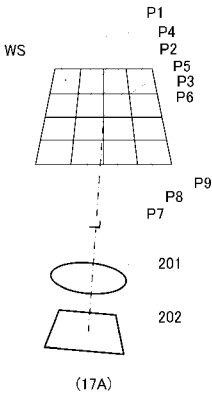
【図 1 3】



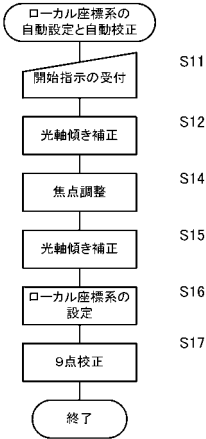
【図 1 6】



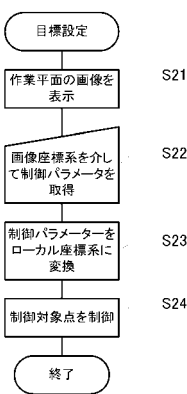
【図 1 7】



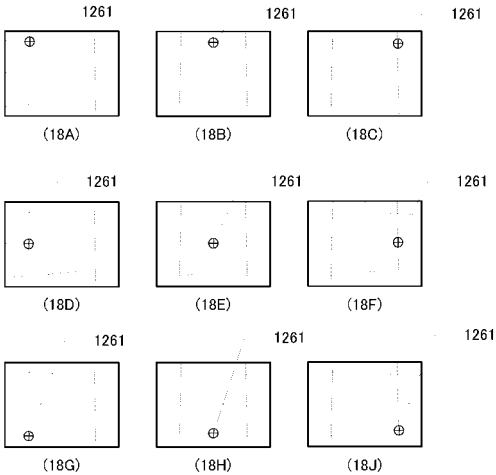
【図 1 4】



【図 1 5】



【図 1 8】



フロントページの続き

(72)発明者 山口 如洋

長野県諏訪市大和3丁目3番5号 セイコーエプソン株式会社内

Fターム(参考) 3C707 BS10 KT01 KT05 KT06 KT09 LV19