

(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)

F 1

B 25 J 9/10

テーマコード(参考)

A 3 C 7 O 7

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。

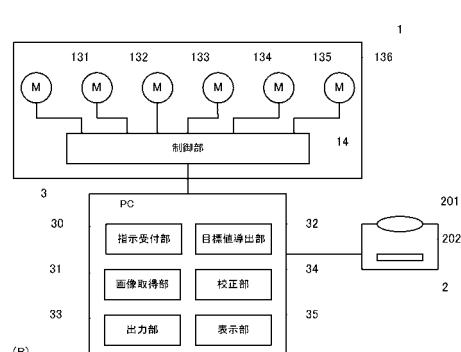
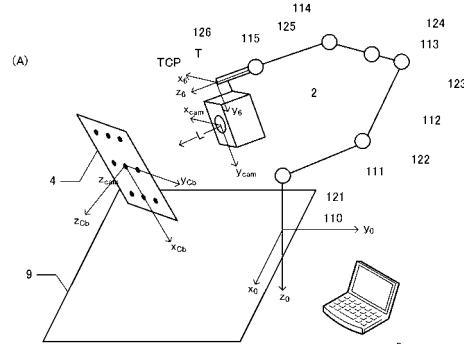
【解決手段】ロボットは、水平でない作業平面内の3点以上を示すマーカーが撮像された

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、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、

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、

40

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 1 2】

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】

【技術分野】

【0 0 0 1】

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】

【0 0 0 2】

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。

【先行技術文献】

【特許文献】

【0 0 0 3】

【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】

【0 0 0 4】

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。

【0 0 0 5】

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】

【0 0 0 6】

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。

【0 0 0 7】

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

を含む。また制御パラメーターとは、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ーを取得する」とは、ローカル座標系によってその数値（制御パラメーター）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ーが取得されることを意味する。なお、制御パラメーター自体がローカル座標系の座標や方向を示していないとも良く、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ー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ーをロボットに取得させることができるために、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プロック図。

【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。

40

【図17】本発明の実施形態にかかる模式的な斜視図。

【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

23、124、125、126によって屈曲するマニピュレーターを備える単腕6軸ロボットである。基台110は、第一アーム111の回転軸部材121を支持している。第一アーム111は回転軸部材121の中心軸を中心にして回転軸部材121とともに基台110に対して回転する。第一アーム111は、第二アーム112の回転軸部材122を支持している。第二アーム112は、回転軸部材122の中心軸を中心にして回転軸部材122とともに第一アーム111に対して回転する。第二アーム112は、第三アーム113の回転軸部材123を支持している。第三アーム113は、回転軸部材123の中心軸を中心にして回転軸部材123とともに第二アーム112に対して回転する。第三アーム113は、第四アーム114の回転軸部材124を支持している。第四アーム114は、回転軸部材124の中心軸を中心にして回転軸部材124とともに第三アーム113に対して回転する。第四アーム114は、第五アーム115の回転軸部材125を支持している。第五アーム115は、回転軸部材125の中心軸を中心にして回転軸部材125とともに第四アーム114に対して回転する。第五アーム115は、ツールが装着される回転軸部材126を支持している。

10

【0013】

先端の回転軸部材126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1261が設けられている。図2Aに示すように、ツールチャック1261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TJが装着される。ツールチャック1261は、回転軸部材126の回転軸上に各種のツールの軸部TJ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1261に正しく装着された状態において、ツールの軸部TJの中心軸は、回転軸部材126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(TCP)という。本実施例においてTCPは制御対象点となる。

20

【0014】

図1Bに示すように、ロボット1は、回転軸部材121を駆動するモーター131と、回転軸部材122を駆動するモーター132と、回転軸部材123を駆動するモーター133と、回転軸部材124を駆動するモーター134と、回転軸部材125を駆動するモーター135と、回転軸部材126を駆動するモーター136と、モーター131～136を制御する制御部14とを備えている。モーター131～136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14は、TCPの位置と姿勢を示す目標値やJOG送り指示をPC3から取得し、目標値とJOG送り指示に基づいてモーター131～136を制御する。

30

【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Rb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J1～J6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Lc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Rbは、それぞれが水平なx₀軸とy₀軸と、鉛直下向きを正方向とするz₀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126とともに回転する座標系J6は、TCPを原点とし、回転軸部材126の回転軸と平行なz₆軸と、z₆軸に対してそれが垂直なx₆軸とy₆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。

40

【0016】

ツールチャック1261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126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201、エリアイメージセンサー202、図示しないAD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

50

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の垂直方向に対応する 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。10

【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の画素数と大きさとに応じて定まる。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。20

【0019】

ところで、作業平面が水平でない場合、 x_0y_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にとって不变であるため、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。3040

【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ー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ーである。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

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G.U.I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ーを、G.U.Iを介して取得する。すなわち指示受付部は、制御パラメーター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Cb)でPc3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良いし、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良い。またマーカーによって平面を特定できればよいため、マーカーが指示する基準点の数は3以上であればよい。

10

20

30

【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Imからローカル座標系Lcへの座標変換や、ローカル座標系Lcから基準座標系Rb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Rbとローカル座標系Lcの対応関係を定める変換行列 R^b_{Lc} 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に基づいて導出することによりローカル座標系Lc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。

30

【0025】

校正部34は、画像座標系Imと基準座標系Rb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P1～P9)の位置関係が定められた後に、変換行列 $I^m R_{Rb}$ 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

40

【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良い。

【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、才

50

ペレーターが開始指示を P C 3 に入力することによって起動する。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、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 T C P を移動させるジョグ送り操作だけであってもよい。

【 0 0 2 9 】

開始指示が P C 3 に入力されると (S 1) 、 P C 3 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 (S 2) 。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 4 1 ~ 4 9 が画像座標系 I m 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 4 5 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 1 1 1 ~ 1 1 5 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 4 5 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。

10

【 0 0 3 0 】

低精度垂直状態になると、 P C 3 はローカル座標系 L c の仮設定を実行する (S 3) 。具体的には回転軸部材 1 2 1 ~ 1 2 5 の回転角度とカメラ設定とに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 I m と基準座標系 R b 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 1 2 1 ~ 1 2 5 の回転角度とカメラ設定とにに基づいて設定するローカル座標系 L c 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 L c の x_{L_c} 軸はイメージセンサー 2 0 2 の水平方向と平行にならず、ローカル座標系 L c の y_{L_c} 軸はイメージセンサー 2 0 2 の垂直方向と平行にならない。

20

【 0 0 3 1 】

次に P C 3 は、焦点調整を実行する (S 4) 。焦点調整では、ローカル座標系 L c 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 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。さらに P C 3 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 1 1 1 ~ 1 1 5 を動かして合焦状態にする。詳細は後述する。

30

【 0 0 3 2 】

次に P C 3 は、ローカル座標系 L c 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 L c を更新する (S 5) 。詳細には次の通りである。

40

【 0 0 3 3 】

基準座標系 R b 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 1 2 1 ~ 1 2 6 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 1 1 5 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 L c 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 T C P 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 L c 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 L c 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 4 5 も画像座標系 I m において動く。

【 0 0 3 4 】

そこでまず P C 3 は、ローカル座標系 L c の z_{L_c} 軸の方向にカメラ 2 を動かす前後に

50

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ー45の中心位置を画像座標系Imで検出する。そしてPC3は、 z_{Lc} 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ー45の中心座標を(u_1, v_1)とし、 z_{Lc} 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ー45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PC3は、傾き指標 H_x 、 H_y に基づいて、TCP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121～126の回転角度に基づいてローカル座標系Lc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Lcの z_{Lc} 軸は光軸Lと平行になる。

10

【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Lcを徐々に補正しても良い。また、 z_{Lc} 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。

20

【0037】

次にPC3は、ローカル座標系Lcの x_{Lc} 軸方向にTCP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ー45が画像座標系Imの水平方向にのみ動くように、カメラ設定の撮像姿勢を、J6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(S6)。詳細には次の通りである。

20

【0038】

まずPC3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(u_3, v_3)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、ステップS5で更新されたローカル座標系Lcの z_{Lc} 軸とカメラ座標系Camの z_{cam} 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、マーカー45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PC3は、ステップS5で更新されたローカル座標系Lcの x_{Lc} 軸方向にカメラ2を x だけ移動させる。続いてPC3は、カメラ2から画像を取得し、取得した画像からマーカー45の中心位置(u_4, v_4)を検出する。ローカル座標系Lcの x_{Lc} 軸がカメラ座標系Camの x_{cam} 軸と平行に設定されていれば、カメラ2が x_{Lc} 軸方向に移動しても、画像座標系Imにおいてマーカー45は垂直方向に移動しない。しかし、ローカル座標系Lcの x_{Lc} 軸がカメラ座標系Camの x_{cam} 軸と平行に設定されていなければ、TCPが x_{Lc} 軸方向に移動すると、画像座標系Imにおいてマーカー45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Lcの x_{Lc} 軸と y_{Lc} 軸とを、 z_{Lc} 軸を中心として回転させる補正角度 $\Delta\theta$ を次式(3)で導出し、ローカル座標系Lcの x_{Lc} 軸と y_{Lc} 軸の方向とカメラ設定の回転成分 u とを補正する。

30

【数1】

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

【0039】

次にPC3は、ローカル座標系Lcの z_{Lc} 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ー45が画像座標系Imにおいて動かないよう

40

50

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Lcを更新す

る（S7）。

【0040】

ここでステップS7の処理を図11に基づいて詳細に説明する。まずPC3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が位置する初期状態にカメラ2を移動させる（S71）。具体的には、ステップS6で更新されたローカル座標系Lcの z_{Lc} 軸とカメラ座標系Camの z_{cam} 軸とが平行になり、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を移動させる。

【0041】

続いてPC3は基準座標系Rbにおけるローカル座標系Lcの原点の座標を移動後のTCPの位置とカメラ設定に基づいて更新する（S72）。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Lcの原点が設定される。

【0042】

続いてPC3は、ローカル座標系Lcの z_{Lc} 軸を回転軸としてカメラ2を規定角度（例えば30度）だけ回転させる（S73）。ローカル座標系Lc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45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。

【0043】

続いてPC3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45の中心位置を検出する（S74）。回転軸がマーカー45の中心を通っていないため、回転後のマーカー45の中心位置は回転前とは異なった位置で検出される。

【0044】

続いてPC3は、規定回数だけステップS73でカメラ2を回転させたか否か判定する（S75）。規定回数だけステップS73でカメラ2を回転させていなければ、PC3はステップS73から処理を繰り返す。ステップS73、74の処理が繰り返されると、マーカー45の中心の軌跡は図12に示すように円弧を描く。

【0045】

規定回数だけステップS73でカメラ2を回転させていれば、PC3はマーカー45の中心が描いた円弧の中心O（ u_7, v_7 ）を画像座標系Imで導出する（S76）。

【0046】

続いてPC3は、画像座標系Im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Lcの原点となるように基準座標系Rbにおいてローカル座標系LCを x_{Lc}, y_{Lc} 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Lcと基準座標系Rb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（S77）。ローカル座標系が確定しておらず画像座標系Imと基準座標系Rbが校正されていないこの段階では、ローカル座標系Lcまたは基準座標系Rbと画像座標系Imとの対応関係は定まっていない。そこでPC3は、ステップS76で求めた円弧の中心Oにマーカー45が位置するようにカメラ2を並進させ、座像座標系Imにおいて検出するマーカー45の移動前後の座標と、基準座標系Rbの移動前後の撮像位置（TCPとカメラ設定によって定まる撮像位置）に基づいて画像座標系ImとステップS72で設定したローカル座標系Lcとの対応関係を導出する。続いてPC3は、導出した対応関係に基づいて画像座標系Imにおける円弧の中心Oの座標をステップS72で設定したローカル座標系Lcの座標に変換する。続いてPC3は、ステップS72で設定したローカル座標系Lcにおける円弧の中心Oの座標を基準座標系Rb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Lcを導出する。その結果、ステップS72で設定したローカル座標系LCは x_{Lc}, y_{Lc} 平面と平行に移動する。また基準座標系Rbに変換された円弧の中心Oの x_{rb}, y_{rb} 座標は、実際のカメラ2の撮像位置の x_{rb}, y_{rb} 座標と一致する。そこでPC3は、円弧の中心Oの x_{rb}, y_{rb} 座標とTCPの位置座標とに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

【0047】

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。

【0048】

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。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_{Lc} 軸とカメラ座標系 C a m の z_{cam} 軸とが平行になり、マーカー 4 5 の重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。

【0049】

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。

10

【0050】

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ー 4 1 ~ 4 9 の位置を画像座標系 I m で検出し、検出したマーカー 4 1 ~ 4 9 の位置とマーカー座標系 C b におけるマーカー 4 1 ~ 4 9 の位置とにに基づいてマーカーボード 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ー座標系 C b における距離との関係は、マーカーボード 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 におけるマーカー 4 1 ~ 4 9 の位置から算定されるマーカー間距離と、マーカー座標系 C b におけるマーカー 4 1 ~ 4 9 の位置から算定されるマーカー間距離とともにとづいて距離 H を導出する。

20

【0051】

続いて P C 3 は、図 13 に示すように、撮像位置を変えずにカメラ 2 を x_{cam} 軸または y_{cam} 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ー 4 5 の中心位置を検出しながら、再びマーカー 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_{Lc} y_{Lc} 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 a m の x_{cam} 軸はローカル座標系 L c の x_{Lc} 軸と平行で、カメラ座標系 C a m の y_{cam} 軸はローカル座標系 L c の y_{Lc} 軸と平行である。

30

【0052】

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_{Lc} 方向 (マーカーボード 4 に対して垂直な方向) にずれている。このため、図 13 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 θ 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。

40

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

【0053】

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 121 ~ 126 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】

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

【0054】

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

50

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。

10

【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、(a₁₁, a₂₁, a₃₁) 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、(a₁₂, a₂₂, a₃₂) 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、(a₁₃, a₂₃, a₃₃) 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。

20

【数3】

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

【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。

30

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

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

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

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

40

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

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

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

【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

50

PS23で導出した傾き指標に基づいて、カメラ2の光軸Lに対してマーカーボード4が垂直になり、かつ、光軸Lが中央のマーカー45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33によってロボット1の制御部14に出力される。その結果、アーム111～115が動く(S25)。

【0061】

目標値を出力部33がロボット1に出力してアーム111～115が動いて停止すると、画像取得部31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32が傾き指標を導出して評価する上述のステップS21からステップS24の処理が繰り返される。

【0062】

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TCPを移動させながら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。

【0063】

はじめに目標値導出部32は現在のTCPの位置と姿勢を保存する(S31)。すなわち、ステップS2の傾き補正が終了した時点におけるTCPの位置と姿勢が保存される。

【0064】

次に、目標値導出部32は、マーカー座標系Cbでのマーカー41～49の各重心の座標と、画像座標系でのマーカー41～49の各重心の座標とにに基づいて、カメラ2からマーカーボード4までの距離とを導出する(S32)。

【0065】

続いて目標値導出部32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(S34)。合焦指標としては、マーカー41～49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8Aおよび図8Bの点線で囲んだ領域のように全てのマーカー41～49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によってマーカー41～49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。

【0066】

続いて目標値導出部32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(S35)。

【0067】

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32はカメラ2の光軸Lと平行でマーカーボード4に接近または離間する方向に所定距離だけTCPを移動させる(S36)。

【0068】

TCPを移動させると、画像取得部31はカメラ2から画像を取得し(S37)、ステップS33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。マーカーボード4に接近するほど、マーカー41～49が写る領域は大きくなり、やがてマーカー41～49は図8Cに示すように画像に收まらなくなる。そこで合焦指標を導出する対象領域は、カメラ2がマーカーボード4に接近するほど大きく設定され、マーカー41～49が写る領域が画像の端辺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、徐々に大きくなつた後に徐々に小さくなる。

【0069】

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32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33は導出された目標値をロボット1に出力する(S38)。具体的には例えば、ステップS34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TCP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、J₆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PC3に入力することによって起動する。（S11）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PC3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PC3に入力されると、PC3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（S12）。次にPC3は、焦点調整を実行する（S14）。次にPC3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（S2）および焦点調整（S4）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PC3はローカル座標系の設定を実行する（S16）。詳細にはまずPC3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PC3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_{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、イメージセンサー202の垂直方向と平行なy_{Lc}軸とを有するローカル座標系L_cが設定される。

40

【0075】

次にPC3は9点校正を実施する（ステップS17）。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41～49の位置に基づいて、ローカル座標系 L_c と作業平面を表す画像座標系 I_m を校正できること、および基準座標系 R_b と画像座標系 I_m を構成できることを意味する。

【0076】

具体的には、校正部34は、ローカル座標系 L_c 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41～49の画像座標系 I_m における位置を検出して記憶する。次に校正部34は、検出した各マーカー41～49の中心座標を画像座標系 I_m からローカル座標系 L_c に変換し、各マーカー41～49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34は、画像座標系 I_m において検出した各マーカー41～49の中心座標と、各マーカー41～49の中心が画像の重心に位置するカメラ2の撮像位置とにに基づいて、ローカル座標系 L_c と画像座標系 I_m とを校正する。すなわち、ローカル座標系 L_c と画像座標系 I_m 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41～49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 L_c の座標（撮像位置の座標）と、中央のマーカー45が画像の重心に位置する画像座標系 I_m から検出される9つのマーカー41～49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201の歪みも加味して、正確にローカル座標系 L_c と画像座標系 I_m 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 L_c と基準座標系 R_b との対応関係は既に決められているため、基準座標系 R_b と画像座標系 I_m とは、ローカル座標系 L_c と画像座標系 I_m 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 L_c と画像座標系 I_m とを校正せずに、基準座標系 R_b と画像座標系 I_m 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 L_c が設定され、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15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 L_c 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 I_m 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 L_c の原点に撮像位置を設定し、ローカル座標系 L_c 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35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 I_m を介して取得する（S22）。具体的には例えば指示受付部30（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 I_m 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

10

20

30

40

50

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 T C P 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 P C 3 は、目標点の座標をローカル座標系 L_c に変換する (S 2 3)。すなわち P C 3 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 S 2 2 において制御パラメーターを取得している。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ーとしての目標点の位置と目標姿勢が P C 3 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ーが用いられる。

10

【0081】

次に P C 3 は、ローカル座標系 L_c に変換された制御パラメーターを用いて制御対象点を制御する (S 2 4)。このとき、制御パラメーターは、P C 3 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 1 4 によって回転軸部材 1 2 1 ~ 1 2 6 を駆動するモーター 1 3 1 ~ 1 3 6 の回転角度に変換される。制御部 1 4 は、モーター 1 3 1 ~ 1 3 6 を回転させることによって T C P を作業平面上の目標点に目標姿勢で移動させる。

20

【0082】

なお、実際には、制御パラメーター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、制御パラメーターの入力操作が終了したことを P C 3 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 S 2 3 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て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ーを取得するため、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、P C 3 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、T C P 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、P C 3 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 T C P 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 T C P 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 1 4 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 1 2 1 ~ 1 2 6 を駆動するモーター 1 3 1 ~ 1 3 6 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とも、 $x_{L_c} y_{L_c}$ 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。10

【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变になるため、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示せばよい。具体的には、基準点を指示する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 PC3 に予め記憶しておく。20

【0090】

作業平面を設定するにあたり、PC3 は、作業平面に対して J6 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、PC3 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 Im において基準点 P1 ~ P9 の位置を検出する。30

【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 Rb 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 Rb 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。40

【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 Im 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 Im 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50

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】

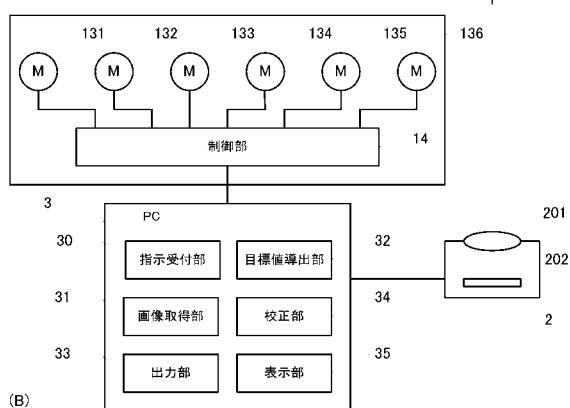
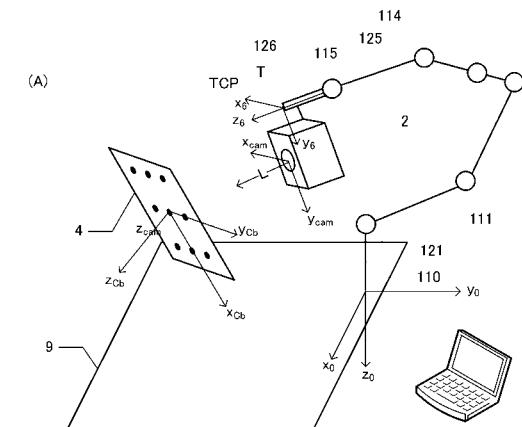
なお、作業面からローカル座標系 L_c の x_{L_c} y_{L_c} 平面までの距離は、マーカー座標系において間隔が既知の2つ以上のマーカーを画像座標系 I_m において検出し、マーカー座標系におけるマーカー同士の間隔と画像座標系 I_m におけるマーカー同士の間隔とに基づいて導出しても良いし、TCPやツールで作業平面をタッチアップする過程でTCPの移動距離を計測して作業面からローカル座標系 L_c の x_{L_c} y_{L_c} 平面までの距離を導出しても良い。

【符号の説明】

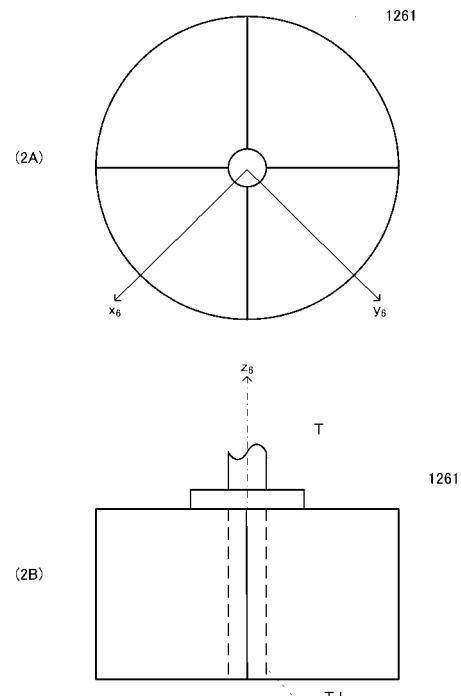
【0095】

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

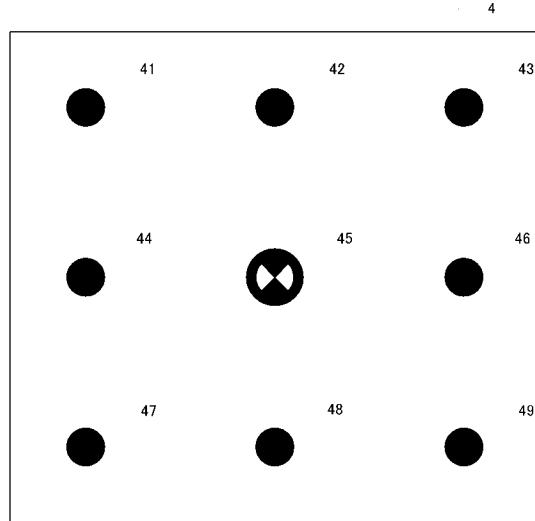
【図1】



【図2】



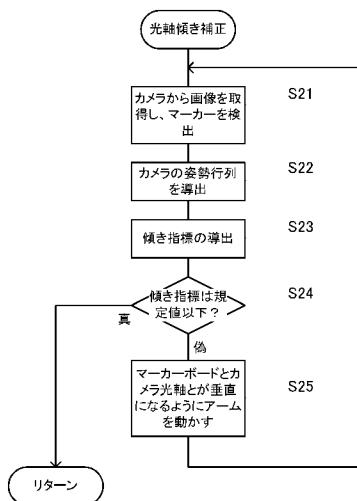
【図3】



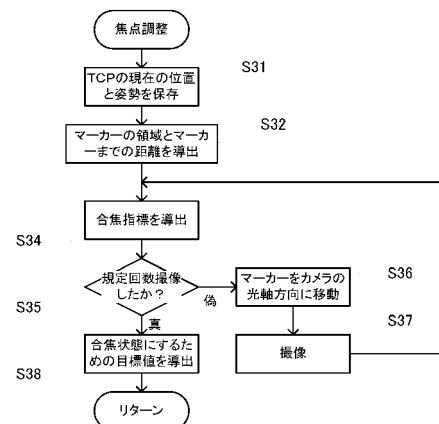
【図4】



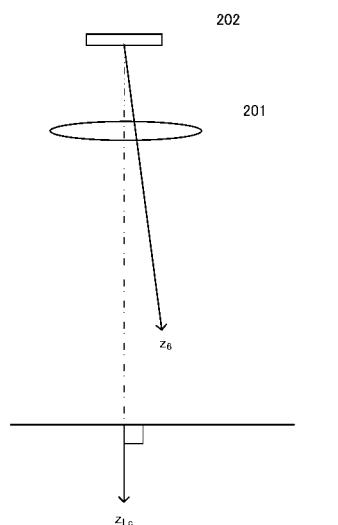
【図5】



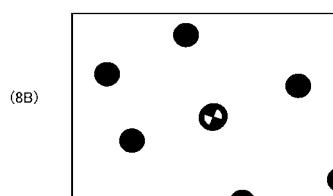
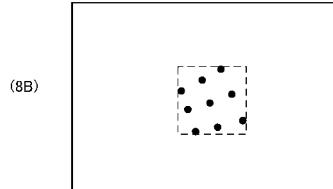
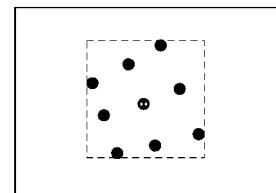
【図6】



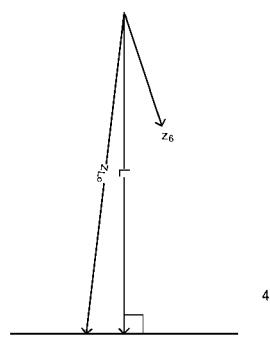
【図7】



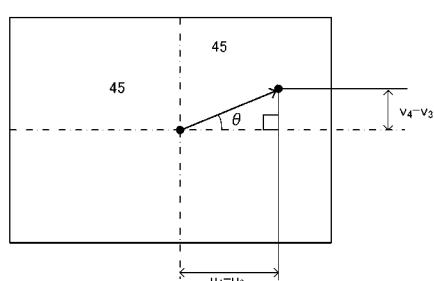
【図8】



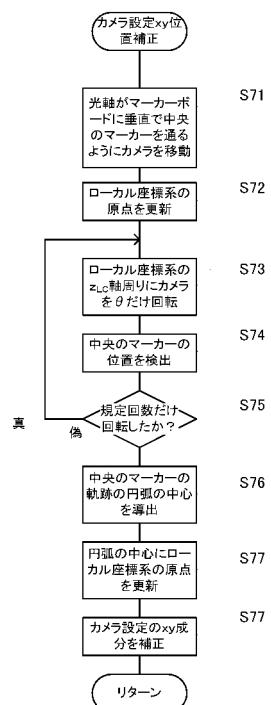
【図9】



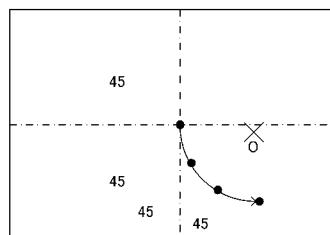
【図10】



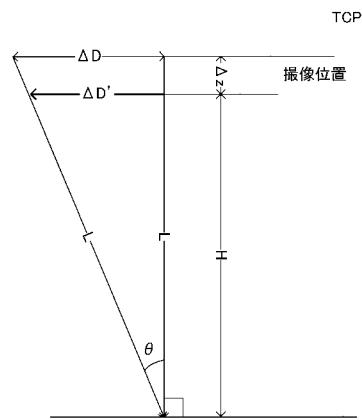
【図11】



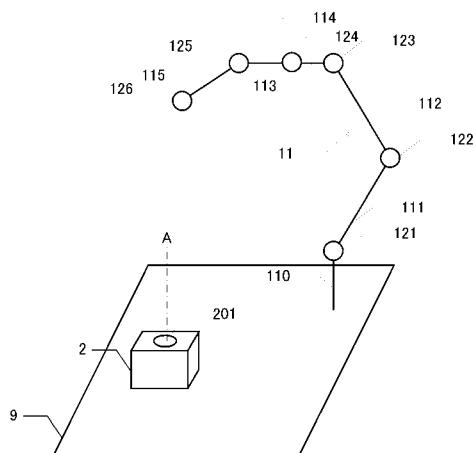
【図12】



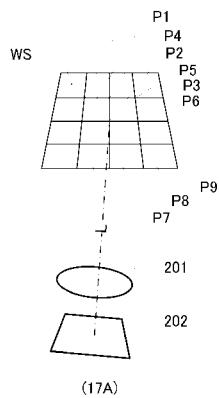
【 図 1 3 】



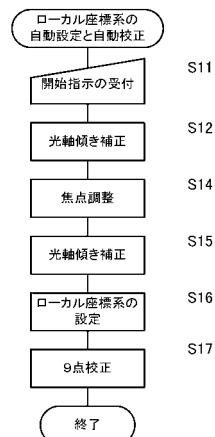
【図16】



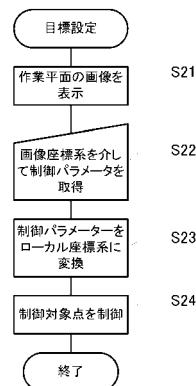
【図 17】



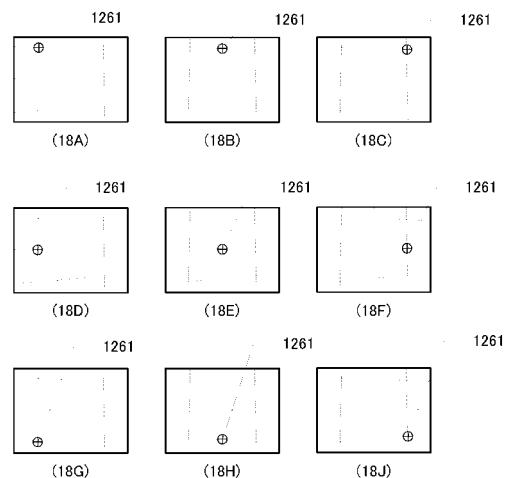
【図 1 4】



【 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