

(19) 日本国特許庁 (JP)

(12) 特 許 公 報 (B1)

(11) 特許番号
特許第6675722号
(P6675722)

(45) 発行日 令和2年4月1日 (2020. 4. 1)

(24) 登録日 令和2年3月13日 (2020. 3. 13)

(51) Int. Cl.

F I

G O 6 T 7/80 (2017. 01) G O 6 T 7/80

B 2 5 J 13/08 (2006. 01) B 2 5 J 13/08 A

B 2 5 J 9/10 (2006. 01) B 2 5 J 9/10 A

請求項の数 20 外国語出願 (全 68 頁)

(21) 出願番号	特願2019-106616 (P2019-106616)	(73) 特許権者	515182347
(22) 出願日	令和1年6月7日 (2019. 6. 7)		株式会社 M U J I N
審査請求日	令和1年6月20日 (2019. 6. 20)		東京都江東区辰巳 3-8-5
(31) 優先権主張番号	16/295, 940	(74) 代理人	100079108
(32) 優先日	平成31年3月7日 (2019. 3. 7)		弁理士 稲葉 良幸
(33) 優先権主張国・地域又は機関		(74) 代理人	100109346
	米国 (US)		弁理士 大貫 敏史
(31) 優先権主張番号	16/362, 471	(74) 代理人	100117189
(32) 優先日	平成31年3月22日 (2019. 3. 22)		弁理士 江口 昭彦
(33) 優先権主張国・地域又は機関		(74) 代理人	100134120
	米国 (US)		弁理士 内藤 和彦
早期審査対象出願		(74) 代理人	100134371
			弁理士 中塚 隆志
		(74) 代理人	100094112
			弁理士 岡部 譲

最終頁に続く

(54) 【発明の名称】 ロボット制御のために自動カメラキャリブレーションを実施する方法及びシステム

(57) 【特許請求の範囲】

【請求項 1】

ロボットと通信し、かつカメラ視野を有するカメラと通信するように構成された通信インターフェースであって、前記ロボットは、ベースと、キャリブレーションパターンが配置されているロボットアームとを有する、通信インターフェースと、

制御回路であって、
前記カメラ視野内に収まる仮想立方体の全ての角位置を求めることと、
前記仮想立方体の上に又は該仮想立方体を通して分散される複数の位置を求めることと、

前記通信インターフェースを介して前記ロボットに移動コマンドを出力することにより、前記仮想立方体の上に又は該仮想立方体を通して分散される前記複数の位置まで前記キャリブレーションパターンを移動させるように前記ロボットアームを制御することと、

前記通信インターフェースを介して前記カメラから複数のキャリブレーション画像を受け取ることであって、該複数のキャリブレーション画像は、前記カメラによって取り込まれ、前記複数の位置における前記キャリブレーションパターンのそれぞれの画像であることと、

前記複数のキャリブレーション画像に基づき、固有カメラパラメーターのそれぞれの推定値を求めることと、

前記固有カメラパラメーターの前記それぞれの推定値に基づき、カメラ座標系とワールド座標系との関係を記述する変換関数の推定値を求めることであって、前記カメラ座標

10

20

系は、前記カメラの位置及び向きに関して定義された座標系であり、前記ワールド座標系は、前記ロボットの前記ベースに対して固定である位置に関して定義された座標系であることと、

により、カメラキャリブレーションを実施するように構成された制御回路と、
を備え、

前記制御回路は、前記カメラキャリブレーションが実施された後、前記通信インターフェースを介して前記カメラから後続する画像を受け取り、前記後続する画像に基づきかつ前記変換関数の前記推定値に基づく後続する移動コマンドを、前記通信インターフェースを介して前記ロボットに出力することにより、前記ロボットアームの配置を制御するように更に構成されている、ロボット制御システム。

10

【請求項 2】

前記複数の位置は、前記仮想立方体の上に又は該仮想立方体を通して一様に分散されている、請求項 1 に記載のロボット制御システム。

【請求項 3】

前記複数の位置は、該複数の位置のうちの隣接する位置の間に、前記仮想立方体の縁に沿って測定される一様の間隔を有する、請求項 2 に記載のロボット制御システム。

【請求項 4】

前記制御回路は、前記ロボットアームが前記仮想立方体の全ての角位置まで前記キャリブレーションパターンを移動させることができるという判断に応じて、前記複数の位置まで前記キャリブレーションパターンを移動させるように前記ロボットアームを制御するように構成されている、請求項 1 に記載のロボット制御システム。

20

【請求項 5】

前記制御回路は、(a) 前記ロボットアームが、前記仮想立方体の全ての角位置まで前記キャリブレーションパターンを移動させることができるという判断、及び (b) 前記ロボットアームが、前記仮想立方体の全ての角位置のうちの各角位置において、前記カメラに対する角度の定義された範囲内にある角度まで前記キャリブレーションパターンを傾けることができるという判断に応じてのみ、前記複数の位置まで前記キャリブレーションパターンを移動させるように前記ロボットアームを制御するように構成されている、請求項 4 に記載のロボット制御システム。

【請求項 6】

前記仮想立方体が、前記制御回路によって求められる第 2 の仮想立方体であり、前記制御回路は、

30

前記カメラ視野内に収まる第 1 の仮想立方体を求め、

前記ロボットアームが、前記第 1 の仮想立方体の 1 つ以上の角位置まで前記キャリブレーションパターンを移動させることができないと判断するか、又は、前記ロボットアームが、前記第 1 の仮想立方体の 1 つ以上の角位置に対して、前記カメラに対する角度の定義された範囲内にある角度まで前記キャリブレーションパターンを傾けることができないと判断する、

ように更に構成され、

前記制御回路は、(a) 前記ロボットアームが前記第 1 の仮想立方体の 1 つ以上の角位置まで前記キャリブレーションパターンを移動させることができないという判断、又は (b) 前記ロボットアームが、前記第 1 の仮想立方体の 1 つ以上の角位置に対して、前記カメラに対する角度の定義された範囲内にある角度まで前記キャリブレーションパターンを傾けることができないという判断のうちの少なくとも一方に応じて、前記第 2 の仮想立方体の全ての角位置を求めるように構成されている、請求項 5 に記載のロボット制御システム。

40

【請求項 7】

前記第 1 の仮想立方体は、前記カメラ視野内に収まることのできる最大サイズの仮想立方体であり、前記第 2 の仮想立方体は、前記第 1 の仮想立方体より小さい、請求項 6 に記載のロボット制御システム。

50

【請求項 8】

前記複数の位置は厳密に n^3 個の位置を含み、 n は 2 以上の整数である、請求項 1 に記載のロボット制御システム。

【請求項 9】

前記制御回路は、前記移動コマンドを介して、前記仮想立方体の上に又は該仮想立方体を通して一様に分散される前記複数の位置に対して前記カメラに対する異なるそれぞれの角度まで前記キャリブレーションパターンを傾けるように、前記ロボットアームを制御するように構成され、それにより、前記複数のそれぞれのキャリブレーション画像は、前記カメラに対する異なるそれぞれの角度における前記キャリブレーションパターンを取り込む、請求項 1 に記載のロボット制御システム。

10

【請求項 10】

前記キャリブレーションパターンは複数のパターン要素を含み、前記制御回路は、

前記複数のキャリブレーション画像が受け取られる前に前記カメラから第 1 のキャリブレーション画像を受け取り、該第 1 のキャリブレーション画像は、前記キャリブレーションパターンの画像であり、前記複数のそれぞれのキャリブレーション画像が取り込まれる前に前記カメラによって取り込まれ、

前記第 1 のキャリブレーション画像における前記パターン要素のうちの少なくとも 1 つの強度のレベル及びコントラストのレベルを求め、

前記第 1 のキャリブレーション画像における前記パターン要素のうちの少なくとも 1 つの前記強度のレベル及び前記コントラストのレベルのうちの少なくとも一方に基づき、前記カメラの露出パラメーター及び焦点パラメーターのそれぞれの値を求める、ように構成され、

20

前記複数のそれぞれのキャリブレーション画像は、前記露出パラメーター及び前記焦点パラメーターの前記それぞれの値を備えた前記カメラによって取り込まれる、請求項 1 に記載のロボット制御システム。

【請求項 11】

前記制御回路は、前記仮想立方体を複数の非オーバーラップ領域に分割することにより、かつ、前記複数の位置のそれぞれの位置を前記複数の非オーバーラップ領域の各領域となるように割り当てることにより、前記複数の位置を求めるように構成されている、請求項 1 に記載のロボット制御システム。

30

【請求項 12】

前記制御回路は、一連の反復にわたり前記複数の位置を求めるように構成され、該複数の位置のうちの第 1 の位置は、前記仮想立方体内の任意の位置として求められ、かつ、前記一連の反復のうちの第 1 の反復の間に求められ、前記仮想立方体は、前記第 1 の反復を実施するために使用される第 1 の領域を形成し、

残りの反復に対するそれぞれの位置は、該残りの反復の各々に対し、(a) 先行する反復を実施するために使用された領域を、互いにオーバーラップしない第 1 の半分領域及び第 2 の半分領域に分割することであって、該第 1 の半分領域及び該第 2 の半分領域の各々は、現反復を実施するために使用される領域であることと、(b) 前記第 1 の半分領域及び前記第 2 の半分領域のうちのいずれが先行する位置を含むかを判断することであって、該先行する位置は、前記先行する反復において求められた前記複数の位置のそれぞれの位置であることと、(c) 現位置として、前記第 1 の半分領域及び前記第 2 の半分領域のうちの他方における任意の位置を求めることであって、前記現位置は、前記現反復に対して求められる前記複数の位置のうちの 1 つの位置であることとを実施することにより、求められる、請求項 1 に記載のロボット制御システム。

40

【請求項 13】

ロボット制御を実施する方法であって、

ロボット制御システムにより、カメラ視野を示す情報を求めることであって、前記ロボット制御システムは、カメラと通信し、かつ、ベース、ロボットアーム及び該ロボットアームに配置されたキャリブレーションパターンを有するロボットと通信するように構成さ

50

れた通信インターフェースを備え、前記カメラ視野は前記カメラの視野であることと、

前記ロボット制御システムにより、前記カメラ視野内に収まる仮想立方体の全ての角位置を求めることと、

前記ロボット制御システムにより、前記仮想立方体の上に又は該仮想立方体を通して分散される複数の位置を求めることと、

前記ロボット制御システムにより、前記通信インターフェースに移動コマンドを出力することであって、該通信インターフェースは、前記ロボットに前記移動コマンドを通信して、前記ロボットアームに対し、前記仮想立方体の上に又は該仮想立方体を通して分散される前記複数の位置まで前記キャリブレーションパターンを移動させるように構成されることと、

10

前記ロボット制御システムにより、前記通信インターフェースから複数のキャリブレーション画像を受け取ることであって、該通信インターフェースは、前記カメラから前記複数のキャリブレーション画像を受け取るように構成され、該複数のキャリブレーション画像は、前記カメラにより取り込まれ、前記複数の位置における前記キャリブレーションパターンの複数のそれぞれの画像であることと、

前記ロボット制御システムにより、前記複数のキャリブレーション画像に基づき固有カメラパラメーターのそれぞれの推定値を求めることと、

前記ロボット制御システムにより、前記固有カメラパラメーターの前記それぞれの推定値に基づき、カメラ座標系とワールド座標系との関係を記述する変換関数の推定値を求めることであって、前記カメラ座標系は、前記通信インターフェースが通信するように構成される前記カメラの位置及び向きに関して定義された座標系であり、前記ワールド座標系は、前記通信インターフェースが通信するように構成される前記ロボットの前記ベースに対して固定である位置に関して定義される座標系であることと、

20

前記ロボット制御システムにより、前記通信インターフェースから後続する画像を受け取ることであって、該通信インターフェースは、前記固有カメラパラメーターの前記それぞれの推定値と前記変換関数の前記推定値とを求めた後、前記カメラから前記後続する画像を受け取るように構成されることと、

前記ロボット制御システムにより、前記後続する画像に基づき、かつ、前記変換関数の前記推定値に基づき、後続する移動コマンドを生成することと、

前記ロボット制御システムにより、前記通信インターフェースに前記後続する移動コマンドを出力することであって、該通信インターフェースは、前記ロボットアームの配置を制御するように前記ロボットに前記後続する移動コマンドを通信するように構成されることと、

30

を含む、方法。

【請求項 1 4】

前記複数の位置は、前記仮想立方体の上に又は該仮想立方体を通して一様に分散される、請求項 1 3 に記載の方法。

【請求項 1 5】

前記複数の位置は厳密に n^3 個の位置を含み、 n は 2 以上の整数である、請求項 1 4 に記載の方法。

40

【請求項 1 6】

ロボット制御システムの制御回路によって実行されると、該制御回路に対して、

カメラ視野を示す情報を求めることであって、前記ロボット制御システムは、カメラと通信し、かつ、ベース、ロボットアーム及び該ロボットアームに配置されたキャリブレーションパターンを有するロボットと通信するように構成された通信インターフェースを備え、前記カメラ視野は前記カメラの視野であることと、

前記カメラ視野内に収まる仮想立方体の全ての角位置を求めることと、

前記仮想立方体の上に又は該仮想立方体を通して分散される複数の位置を求めることと、

、

前記通信インターフェースに移動コマンドを出力することであって、該通信インターフ

50

エースは、前記ロボットに前記移動コマンドを通信して、前記ロボットアームに対し、前記仮想立方体の上に又は該仮想立方体を通して分散される前記複数の位置まで前記キャリブレーションパターンを移動させるように構成されることと、

前記通信インターフェースから複数のキャリブレーション画像を受け取ることであって、該通信インターフェースは、前記カメラから前記複数のキャリブレーション画像を受け取るように構成され、該複数のキャリブレーション画像は、前記カメラにより取り込まれ、前記複数の位置における前記キャリブレーションパターンの複数のそれぞれの画像であることと、

前記複数のキャリブレーション画像に基づき固有カメラパラメーターのそれぞれの推定値を求めることと、

10

前記固有カメラパラメーターの前記それぞれの推定値に基づき、カメラ座標系とワールド座標系との関係を記述する変換関数の推定値を求めることであって、前記カメラ座標系は、前記通信インターフェースが通信するように構成される前記カメラの位置及び向きに関して定義された座標系であり、前記ワールド座標系は、前記通信インターフェースが通信するように構成される前記ロボットの前記ベースに対して固定である位置に関して定義される座標系であることと、

により、カメラキャリブレーションを実施させ、

前記通信インターフェースから後続する画像を受け取らせ、該通信インターフェースは、前記固有カメラパラメーターの前記それぞれの推定値と前記変換関数の前記推定値とを求めた後に前記カメラから前記後続する画像を受け取るように構成され、

20

前記後続する画像に基づきかつ前記変換関数の前記推定値に基づく後続する移動コマンドを、前記通信インターフェースを介して前記ロボットに出力することにより、前記ロボットアームの配置を制御させる、

命令が記憶されている非一時的コンピューター可読媒体。

【請求項 17】

前記命令は、前記制御回路により実行されると、さらに、前記制御回路に対し、前記ロボットアームが前記仮想立方体の全ての角位置まで前記キャリブレーションパターンを移動させることができるか否かを判断させ、前記複数の位置まで前記キャリブレーションパターンを移動させる前記移動コマンドは、前記ロボットアームが前記仮想立方体の全ての角位置まで前記キャリブレーションパターンを移動させることができるという判断に応じて出力される、請求項 16 に記載の非一時的コンピューター可読媒体。

30

【請求項 18】

前記命令は、前記制御回路により実行されると、さらに、前記制御回路に対し、前記ロボットアームが、前記仮想立方体の全ての角位置のうちの各角位置において、前記カメラに対する角度の定義された範囲内にある角度まで前記キャリブレーションパターンを傾けることができるか否かを判断させ、前記複数の位置まで前記キャリブレーションパターンを移動させる前記移動コマンドは、(a) 前記ロボットアームが、前記仮想立方体の全ての角位置まで前記キャリブレーションパターンを移動させることができるという判断、及び (b) 前記ロボットアームが、前記仮想立方体の全ての角位置のうちの各角位置において、前記カメラに対する角度の定義された範囲内にある角度まで前記キャリブレーションパターンを傾けることができるという判断に応じて出力される、請求項 17 に記載の非一時的コンピューター可読媒体。

40

【請求項 19】

前記仮想立方体は前記制御回路によって求められる第 2 の仮想立方体であり、前記命令は、前記制御回路により実行されると、さらに、前記制御回路に対し、

前記カメラ視野内に収まる第 1 の仮想立方体を求めさせ、

前記ロボットアームが、前記第 1 の仮想立方体の 1 つ以上の角位置まで前記キャリブレーションパターンを移動させることができないと判断させるか、又は、前記ロボットアームが、前記第 1 の仮想立方体の 1 つ以上の角位置に対して、前記カメラに対する角度の定義された範囲内にある角度まで前記キャリブレーションパターンを傾けることができない

50

と判断させ、

前記第2の仮想立方体の全ての角位置を求めることは、(a)前記ロボットアームが前記第1の仮想立方体の1つ以上の角位置まで前記キャリブレーションパターンを移動させることができないという判断、又は(b)前記ロボットアームが、前記第1の仮想立方体の1つ以上の角位置に対して、前記カメラに対する角度の定義された範囲内にある角度まで前記キャリブレーションパターンを傾けることができないという判断のうちの少なくとも一方にのみ応じる、請求項18に記載の非一時的コンピューター可読媒体。

【請求項20】

前記第1の仮想立方体は、前記カメラ視野内に収まることができる最大サイズの仮想立方体であり、前記第2の仮想立方体は、前記第1の仮想立方体より小さい、請求項19に記載の非一時的コンピューター可読媒体。

【発明の詳細な説明】

【技術分野】

【0001】

本発明は、ロボット制御のために自動カメラキャリブレーションを実施する方法及びシステムに関する。

【背景技術】

【0002】

自動化がより一般的になるに従い、倉庫保管及び製造環境等、より多くの環境においてロボットが使用されている。例えば、ロボットは、倉庫において物品をパレットに積み込む若しくはパレットから降ろすために、又は、工場においてコンベヤベルトから物体を拾い上げるために使用される場合がある。ロボットの移動は、一定である場合があり、又は、倉庫若しくは工場においてカメラによって撮影される画像等の入力に基づく場合がある。後者の状況では、カメラの特性を求めるために、かつ、カメラとロボットが位置する環境との関係を求めるために、キャリブレーションが行われる場合がある。キャリブレーションは、カメラキャリブレーションと呼ばれる場合があり、カメラによって取り込まれた画像に基づいてロボットを制御するために使用されるキャリブレーション情報を生成することができる。幾つかの実施態様では、カメラキャリブレーションは、人による手動操作を必要とする場合があり、人は、ロボットの移動を手動で制御するか、又は、カメラを手動で制御して、ロボットの画像を取り込むことができる。

【発明の概要】

【0003】

本発明の実施形態の一態様は、ロボット制御のために自動カメラキャリブレーションを実施することに関する。自動カメラキャリブレーションは、通信インターフェース及び制御回路を備えるロボット制御システムによって実施することができる。通信インターフェースは、ロボット及びカメラ視野を有するカメラと通信するように構成することができ、ロボットは、ベースと、キャリブレーションパターンが配置されているロボットアームとを有することができる。ロボット制御システムの制御回路は、a)カメラ視野内に収まる仮想立方体の全ての角位置(コーナー・ロケーション)を求めることと、b)仮想立方体の上に又は仮想立方体を通して分散される複数の位置を求めることと、c)通信インターフェースを介してロボットに移動コマンドを出力することにより、仮想立方体の上に又は仮想立方体を通して分散される複数の位置までキャリブレーションパターンを移動させるようにロボットアームを制御することと、d)通信インターフェースを介してカメラから複数のキャリブレーション画像を受け取ることであって、複数のキャリブレーション画像は、カメラによって取り込まれ、複数の位置におけるキャリブレーションパターンのそれぞれの画像であることと、e)複数のキャリブレーション画像に基づき、固有カメラパラメーターのそれぞれの推定値を求めることと、f)固有カメラパラメーターのそれぞれの推定値に基づき、カメラ座標系とワールド座標系との関係を記述する変換関数の推定値を求めることであって、カメラ座標系は、カメラの位置及び向きに関して定義された座標系であり、ワールド座標系は、ロボットのベースに対して固定である位置に関して定義され

た座標系であることとにより、カメラキャリブレーションを実施するように構成することができる。制御回路は、カメラキャリブレーションが実施された後、通信インターフェースを介してカメラから後続する画像を受け取り、後続する画像に基づきかつ変換関数の推定値に基づく後続する移動コマンドを、通信インターフェースを介してロボットに出力することにより、ロボットアームの配置を制御するように、更に構成することができる。一実施形態では、ロボット制御システムは、制御回路によって実行されると制御回路に対して上記ステップを実施させる命令を記憶する、非一時的コンピューター可読媒体を有することができる。

【0004】

実施形態の1つの態様はまた、ロボット制御のために自動カメラキャリブレーションを実施することに関する。自動カメラキャリブレーションは、通信インターフェース及び制御回路を備えるロボット制御システムによって実施することができる。通信インターフェースは、ベースとキャリブレーションパターンが配置されているロボットアームとを有するロボット、及びカメラ視野を有するカメラと通信するように構成することができる。キャリブレーションパターンは、パターン座標系においてそれぞれの定義されたパターン要素位置を有する複数のパターン要素を含むことができ、パターン座標系は、キャリブレーションパターンの位置及び向きに関して定義された座標系である。制御回路は、a) 通信インターフェースを介してロボットに移動コマンドを出力することにより、カメラ視野内の少なくとも1つの位置までキャリブレーションパターンを移動させるようにロボットアームを制御することと、b) 通信インターフェースを介してカメラからキャリブレーション画像を受け取ることであって、キャリブレーション画像は、カメラによって取り込まれ、少なくとも1つの位置におけるキャリブレーションパターンの画像であることと、c) 複数のパターン要素がキャリブレーション画像に現れるそれぞれの位置を示す複数の画像パターン要素位置を求めることと、d) 複数の画像パターン要素位置に基づき、かつ、定義されたパターン要素位置に基づき、第1の固有カメラパラメーターの第1の推定値を求めることと、e) 第1の固有カメラパラメーターの第1推定値が求められた後、第1の固有カメラパラメーターの第1の推定値に基づき、かつ、複数の画像パターン要素位置に基づき、第2の固有カメラパラメーターの第1の推定値を求めることと、f) 第2の固有カメラパラメーターの第1の推定値に基づき、かつ、複数の画像パターン要素位置及び定義されたパターン要素位置に基づき、第1の固有カメラパラメーターの第2の推定値及び第2の固有カメラパラメーターの第2の推定値を求めることと、g) 第1の固有カメラパラメーターの第2の推定値及び第2の固有カメラパラメーターの第2の推定値に基づき、カメラ座標系とワールド座標系との関係を記述する変換関数の推定値を求めることであって、カメラ座標系は、カメラの位置及び向きに関して定義された座標系であり、ワールド座標系は、ロボットのベースに対して固定である位置に関して定義された座標系であることとにより、カメラキャリブレーションを実施するように構成することができる。制御回路は、カメラキャリブレーションが実施された後、カメラから後続する画像を受け取り、後続する画像に基づきかつ変換関数の推定値に基づく後続する移動コマンドをロボットに出力することにより、ロボットアームの配置を制御するように、更に構成することができる。

【0005】

本発明の上述の特徴、目的、及び利点、並びに他の特徴、目的、及び利点は、添付の図面に示されるような本発明の実施形態の以下の説明から明らかであろう。本明細書に組み込まれるとともに本明細書の一部をなす添付の図面は更に、本発明の原理を説明するとともに、当業者が本発明を実施及び使用することを可能にする役割を果たす。図面は一定縮尺ではない。

【図面の簡単な説明】

【0006】

【図1A】本発明の実施形態による、カメラキャリブレーションが実施されるシステムのブロック図である。

【図 1 B】本発明の実施形態による、カメラキャリブレーションが実施されるシステムのブロック図である。

【図 1 C】本発明の実施形態による、カメラキャリブレーションを実施するように構成されたロボット制御システムのブロック図である。

【図 2 A】本発明の実施形態による、ロボットがカメラキャリブレーションから得られるキャリブレーション情報に基づいて制御されていることを示すシステムの図である。

【図 2 B】本発明の実施形態による、カメラキャリブレーションの固有キャリブレーションフェーズ及びハンドーアイキャリブレーションフェーズによって得られるキャリブレーション情報の一例を示す図である。

【図 3 A】本発明の実施形態による、カメラキャリブレーションに関与するカメラのモデルを示す図である。

10

【図 3 B】本発明の実施形態による、カメラキャリブレーションを実施することに関与する座標系を示す図である。

【図 3 C】本発明の実施形態による、カメラキャリブレーションを実施することに関与する座標系を示す図である。

【図 4】本発明の実施形態による、カメラの視野（カメラ視野とも呼ぶ）内のキャリブレーションパターンを配置すべき位置を求め、求められた位置においてキャリブレーションパターンのそれぞれの画像を取り込む方法を示すフロー図である。

【図 5 A】本発明の実施形態による、ロボットアームがカメラの視野内の様々な位置にキャリブレーションパターンを配置するシステム例を示す図である。

20

【図 5 B】本発明の実施形態による、ロボットアームがカメラの視野内の様々な位置にキャリブレーションパターンを配置するシステム例を示す図である。

【図 5 C】本発明の実施形態による、キャリブレーションパターンが配置される様々な位置を囲む仮想立方体を示す図である。

【図 5 D】本発明の実施形態による、キャリブレーションパターンが配置される様々な位置を囲む仮想立方体を示す図である。

【図 5 E】本発明の実施形態による、キャリブレーションパターンが配置される様々な位置を囲む仮想立方体を示す図である。

【図 5 F】本発明の実施形態による、キャリブレーションパターンが配置される様々な位置を囲む仮想立方体を示す図である。

30

【図 6 A】本発明の実施形態による、カメラによって取り込まれたキャリブレーションパターンの画像であるキャリブレーション画像例を示す図である。

【図 6 B】本発明の実施形態による、カメラによって取り込まれたキャリブレーションパターンの画像であるキャリブレーション画像例を示す図である。

【図 6 C】本発明の実施形態による、カメラによって取り込まれたキャリブレーションパターンの画像であるキャリブレーション画像例を示す図である。

【図 6 D】本発明の実施形態による、カメラによって取り込まれたキャリブレーションパターンの画像であるキャリブレーション画像例を示す図である。

【図 7】本発明の実施形態による、カメラの視野内に収まる仮想立方体を示す図である。

【図 8 A】本発明の実施形態による、キャリブレーションパターン例を示す図である。

40

【図 8 B】本発明の実施形態による、画像がレンズ歪みの影響を示すキャリブレーションパターンの画像例を示す図である。

【図 9 A】本発明の実施形態による、カメラキャリブレーションを実施する方法を示すフロー図である。

【図 9 B】本発明の実施形態による、カメラキャリブレーションを実施する方法を示すフロー図である。

【図 10】本発明の実施形態による、キャリブレーションパターンの画像における湾曲の量を求める態様を示す図である。

【図 11 A】本発明の実施形態による、カメラキャリブレーションの固有キャリブレーションフェーズの例を示す図である。

50

【図 1 1 B】本発明の実施形態による、カメラキャリブレーションの固有キャリブレーションフェーズの例を示す図である。

【図 1 2】本発明の実施形態による、カメラキャリブレーションのハンドーアイキャリブレーションフェーズの一例を示す図である。

【発明を実施するための形態】

【0007】

以下の詳細な説明は、本質的に単に例示のものであり、本発明又は本発明の用途及び使用を限定することを意図するものではない。さらに、前出の技術分野、背景技術、発明の概要又は以下の詳細な説明において提示されるいかなる明示された又は暗示された理論によっても限定する意図はない。

【0008】

本明細書に記載する実施形態は、倉庫、製造工場において、又は他の何らかの環境において使用されるロボット等、ロボットを制御するために使用されるカメラのキャリブレーションを実施することに関する。キャリブレーションは、カメラキャリブレーションと呼ばれる場合があり、例えば、ロボット制御システム（ロボットコントローラーとも呼ぶ）が、カメラによって取り込まれる画像に基づいてロボットを制御するロボット制御システムの能力を促進するキャリブレーション情報を生成するために実施することができる。例えば、ロボットは、倉庫において包装品を拾い上げるために使用される場合があり、そこでは、ロボットのアーム又は他の構成要素の配置は、カメラによって取り込まれる包装品の画像に基づくことができる。その場合、キャリブレーション情報は、例えば、ロボットの

アームに対する包装品の位置及び向きを求めるために、包装品の画像とともに使用することができる。より詳細に後述するように、カメラキャリブレーションは、カメラの固有（intrinsic）カメラパラメーターのそれぞれの推定値を求めることと、カメラとその外部環境との関係の推定値を求めることとを含むことができる。固有カメラパラメーターは、カメラの固有パラメーターを指すことができ、カメラの内部（internal）パラメーターとも呼ぶことができ、例えば、行列、ベクトル又はスカラー値である値を有することができる。より詳細に後述するように、固有カメラパラメーターの例としては、射影行列及び歪みパラメーターが挙げられ、固有カメラパラメーターの推定値は、推定された値と呼ぶこともできる。カメラとその外部環境との関係は、場合により、変換関数として表現することができる。この変換関数の推定値は、推定された関数と呼ぶこともできる。場合により、変換関数は、行列によって表される線形変換とすることができる。場合により、カメラキャリブレーションは、定義された位置に配置されるパターン要素を有することができるキャリブレーションパターンを用いて実施することができる。カメラは、キャリブレーションパターンのパターン要素の画像を取り込むことができ、カメラキャリブレーションは、パターン要素の画像をパターン要素の定義された位置と比較することに基づいて実施することができる。

【0009】

本発明の実施形態の 1 つの態様は、第 2 の固有カメラパラメーター（例えば、歪みパラメーター）の推定値を求めるために使用されるものとは別個の段階において第 1 の固有カメラパラメーター（例えば、射影行列）の推定値を求めることにより、カメラキャリブレーションの精度を向上させることに関する。より具体的には、第 1 の固有カメラパラメーターは、第 1 の段階において推定することができ、結果として得られる推定値は、第 2 の段階に対する入力として使用することができる。第 2 の段階では、第 2 の固有カメラパラメーターの推定値が求められる。この手法の下では、第 1 の固有カメラパラメーターの推定値は、第 2 の段階の間では既知であるとみなすことができ、それにより、第 2 の段階は、第 2 の固有カメラパラメーターの推定値を求めることに対して限定することができる。さらに、第 1 の固有カメラパラメーターの推定値は既知であるとみなされるため、第 2 の段階は、カメラの全ての固有カメラパラメーターに対してそれぞれの推定値を求める必要はないが、第 2 の固有カメラパラメーターの推定値のみを求めることに焦点を当てることができる。その結果、第 2 の段階は、全ての固有カメラパラメーターに対するそれぞれの推

10

20

30

40

50

定値が、単一の段階において同時に推定され、その後、固有キャリブレーションの出力として使用される実施態様と比較して、キャリブレーションエラーに対してよりロバストである、第2の固有カメラパラメーターのより正確な推定値をもたらすことができる。

【0010】

例えば、単一の段階は、例えば、固有カメラパラメーターを含み、かつ、キャリブレーションパターンのパターン要素の画像とパターン要素の定義された位置との関係を記述する、一組の連立方程式を生成し解くことにより、カメラの全ての固有カメラパラメーターに対するそれぞれの推定値を同時に求めることができる。場合により、連立方程式は、パターン要素が現れる取り込まれた画像（キャリブレーション画像と呼ぶこともできる）における位置とパターン要素の定義された位置との関係を記述することができる。しかしながら、カメラからの取り込まれたキャリブレーション画像は、画像ノイズを含む可能性があり、それにより、連立方程式の精度が低下する可能性がある。その結果、連立方程式から導出される固有カメラパラメーターのそれぞれの推定値もまた、精度が低下する可能性がある。さらに、連立方程式の各固有カメラパラメーターに対するそれぞれの推定値は、連立方程式を満たすことができるように幾つかの精度を犠牲にする可能性がある。したがって、この単一の段階は、固有カメラパラメーターのその推定値にキャリブレーションエラーを引き起こす可能性があり、それは、カメラによって取り込まれる画像に基づいてロボットのアームを正確に位置決めする能力に影響を与える可能性がある。

10

【0011】

一実施形態では、キャリブレーションエラーは、カメラの全ての固有カメラパラメーターに対してそれぞれの推定値を求めるために複数の段階を使用することによって低減させることができる。上述したように、第1の段階を用いて、第1の固有カメラパラメーターの第1の推定値を求めることができ、第2の段階を用いて、第2の固有カメラパラメーターの第1の推定値を求めることができる。場合により、第1の段階はまた、第2の固有カメラパラメーターに対して別の推定値も生成することができるが、第2の段階は、第1の段階からのこの推定値を無視することができ、代わりに、第2の固有カメラパラメーターに対してそれ自体の推定値を生成することができる。場合により、第2の段階は、全ての固有カメラパラメーターに対してそれぞれの推定値を求める汎用段階ではなく、第2の固有カメラパラメーターのみに対する推定値を求めることに専用である専用段階とすることができる。その結果、第2の段階は、第2の固有カメラパラメーターに対してより正確な推定値を生成することができる。

20

30

【0012】

一実施形態では、複数の段階をパイプライン式に使用することができ、そこでは、上述したように、第1の段階の結果が、第2の段階に対する入力として使用される。より具体的には、第2の段階は、第1の段階からの第1の固有カメラパラメーターの推定値に基づいて第2の固有カメラパラメーターに対する推定値を生成することができる。場合により、第2の段階からの第2の固有カメラパラメーターの推定値は、その後、第1の固有カメラパラメーターの推定値を精密化するために使用することができ、それは、第3の段階として扱うことができる。場合により、第3の段階もまた、第2の固有カメラパラメーターの推定値を精密化することができる。例えば、第2の段階からの第2の固有カメラパラメーターの推定値は、第3の段階により、第2の固有カメラパラメーターに関する通知された初期推量として使用することができる。この初期推量は、高水準の精度を有することができ、したがって、第3の段階が、第1の固有カメラパラメーター及び第2の固有カメラパラメーターの推定値を更に改善するのに役立つことができる。

40

【0013】

一実施形態では、固有カメラパラメーターのそれぞれの推定値は、それぞれのパターン要素のシミュレートされた位置を求めるために使用することにより、推定値の精度を評価する第4の段階において、更に精密化することができる。場合により、第4の段階は、第3の段階に続くことができる。他の場合では、第4の段階は、第2の段階の直後に実施することができるが、上述した第3の段階はスキップすることができる。より詳細に後述するよ

50

うに、パターン要素に対するシミュレートされた位置は、固有カメラパラメーターの推定値に基づきパターン要素が現れると予測される、キャリブレーション画像における予測された位置とすることができる。第4の段階は、それぞれのパターン要素のシミュレートされた位置を、パターン要素が取り込まれたキャリブレーション画像に現れる実際の位置と比較することができる。この段階により、シミュレートされた位置とパターン要素が現れる実際の位置との差を低減させるように、固有カメラパラメーターの推定値を調整することができる。

【0014】

一実施形態では、シミュレートされた位置の確定は、カメラキャリブレーションの固有キャリブレーションフェーズの一部として実施することができる。より詳細に後述するように、カメラキャリブレーションは、ハンドーアイキャリブレーションフェーズを更に含むことができる。一実施形態では、ハンドーアイキャリブレーションフェーズはまた、様々な関数の推定値がそれぞれのパターン要素のシミュレートされた位置に基づいて調整される段階も含むことができる。

10

【0015】

本発明の実施形態の1つの態様は、キャリブレーションパターンに対して様々なポーズを計画することに関し、そこでは、キャリブレーションパターンは、こうしたポーズでカメラによって撮影される。ロボット制御システムが、ポーズを決定し、それらのポーズにキャリブレーションパターンを移動させるようにロボットアームを制御することができる。各ポーズは、カメラに対するキャリブレーションパターンの位置及び／又は向きを指すことができる。一実施形態では、ポーズ計画は、カメラの視野内における、ロボットがキャリブレーションパターンを移動させる複数の位置を決定することを含むことができる。

20

【0016】

場合により、複数の位置は、カメラの視野（カメラ視野とも呼ぶ）内に収まる（例えば、完全に収まる）仮想立方体の上に又は仮想立方体を通して分散させることができる。仮想立方体の使用により、カメラは、一組の多様な位置においてキャリブレーションパターンを取り込むことができ、それにより、カメラキャリブレーションがより多くの組の状況を考慮するようにすることができ、したがって、カメラキャリブレーションをよりロバストにすることができる。例えば、多様な位置は、仮想立方体の角位置とともに、仮想立方体の中心位置を含むことができる。角位置は、カメラの視野の周縁部により近い可能性がある。中心位置は、カメラの真正面である可能性があり、より具体的には、カメラの視野の中心軸に沿って位置することができる。場合により、カメラは、カメラの視野の周縁部の近くに位置する物体を撮影しているときに重要な量のレンズ歪みを導入する可能性があり、カメラの視野の中心軸の近くにある物体を撮影しているときはレンズ歪みをほとんど又は全く導入しない可能性がある。キャリブレーションパターンを配置するための仮想立方体の使用により、キャリブレーションパターンは、カメラの視野の周縁部の近くで撮影され、かつカメラの視野の中心軸の近くで撮影されるようにすることができる。その結果、カメラは、程度の異なるレンズ歪みを示す可能性がある、キャリブレーション画像の多様な組を取り込むことができる。したがって、キャリブレーション画像の多様な組により、カメラキャリブレーションは、カメラのレンズ歪みの特性をより適切に推定することができる。

30

40

【0017】

一実施形態では、カメラキャリブレーションに使用される一組のキャリブレーション画像にわたって、キャリブレーションパターンの向きもまた変更することができる。例えば、ロボット制御システムは、複数の位置のうちの各位置に対して、ロボットアームがカメラに対してキャリブレーションパターンを傾かせる角度を求めることができる。一実施形態では、ロボットアームがキャリブレーションパターンを移動させる複数の位置は、仮想立方体の上で又は仮想立方体を通して一様に分散させるか、又は、仮想立方体を通してランダムに分散させることができる。一実施形態では、仮想立方体は、ロボットアームを介してキャリブレーションパターンが全ての角位置に達することができる立方体でなければ

50

ならない可能性がある。さらに、角位置は、ロボットアームが、キャリブレーションパターンを、幾つかの又は全ての角位置に対して、カメラに対する角度の定義された範囲内にあるように傾かせることができるように、位置付けられなければならない可能性がある。場合により、特定の仮想立方体が上記条件を満たさない場合、ロボット制御システムは、より小さい仮想立方体を用いて上記条件を満たすように試行することができる。

【0018】

図1Aは、自動カメラキャリブレーションを実施するロボット動作システム100のブロック図を示す。ロボット動作システム100は、ロボット150と、ロボット制御システム110（ロボットコントローラーとも呼ぶ）と、カメラ170とを備える。一実施形態では、ロボット動作システム100は、倉庫、製造工場又は他の敷地内に位置することができる。ロボット制御システム110は、カメラキャリブレーション（より詳細に後述する）を実施して、後にロボット150を制御するために使用されるキャリブレーション情報を求めるように構成することができる。場合により、ロボット制御システム110は、カメラキャリブレーションを実施し、かつ、キャリブレーション情報に基づいてロボット150を制御するように構成される。場合により、ロボット制御システム110は、カメラキャリブレーションを実施することに専用とすることができ、別のロボット制御システム（別のロボットコントローラーとも呼ぶ）にキャリブレーション情報を通信することができ、別のロボット制御システムは、それにより、キャリブレーション情報に基づいてロボット150を制御する。ロボット150は、カメラ170によって取り込まれる画像と、キャリブレーション情報とに基づいて、位置決めすることができる。

【0019】

一実施形態において、ロボット制御システム110は、ロボット150及びカメラ170と有線又は無線通信を介して通信するように構成することができる。例えば、ロボット制御システム110は、RS-232インターフェース、ユニバーサルシリアルバス（USB）インターフェース、Ethernetインターフェース、Bluetooth（登録商標）インターフェース、IEEE802.11インターフェース又はそれらの任意の組合せを介して、ロボット150及び／又はカメラ170と通信するように構成することができる。一実施形態では、ロボット制御システム110は、ペリフェラルコンポーネントインターコネクト（PCI）バス等、ローカルコンピューターバスを介して、ロボット150及び／又はカメラ170と通信するように構成することができる。

【0020】

一実施形態では、ロボット制御システム110は、ロボット150とは別個とすることができ、上述した無線又は有線接続を介してロボット150と通信することができる。例えば、ロボット制御システム110は、有線接続又は無線接続を介してロボット150及びカメラ170と通信するように構成されているスタンドアロンコンピューターとすることができる。一実施形態では、ロボット制御システム110は、ロボット150の一体構成要素とすることができ、上述したローカルコンピューターバスを介してロボット150の他の構成要素と通信することができる。場合により、ロボット制御システム110は、ロボット150のみを制御する専用制御システム（専用コントローラーとも呼ぶ）とすることができる。他の場合では、ロボット制御システム110は、ロボット150を含む複数のロボットを制御するように構成することができる。一実施形態では、ロボット制御システム110、ロボット150及びカメラ170は、同じ敷地（例えば、倉庫）に位置する。一実施形態では、ロボット制御システム110は、ロボット150及びカメラ170から遠隔とすることができ、ネットワーク接続（例えば、ローカルエリアネットワーク（LAN）接続）を介してロボット150及びカメラ170と通信するように構成することができる。

【0021】

一実施形態では、ロボット制御システム110は、ロボット150に配置されたキャリブレーションパターン160の画像（キャリブレーション画像とも呼ぶ）を取得する（retrieve）か又は他の方法で受け取るように構成することができる。場合により、ロボット

制御システム 110 は、こうした画像を取り込むようにカメラ 170 を制御するように構成することができる。例えば、ロボット制御システム 110 は、カメラ 170 に対してカメラ 170 の視野（カメラ視野とも呼ぶ）内のシーンの画像を取り込ませるカメラコマンドを生成し、有線又は無線接続を介してカメラコマンドをカメラ 170 に通信するように構成することができる。同じコマンドにより、カメラ 170 はまた、画像を（画像データとして）ロボット制御システム 110、又はより一般的には、ロボット制御システム 110 がアクセス可能な記憶装置に通信して戻すこともできる。代替的に、ロボット制御システム 110 は、別のカメラコマンドを生成することができ、それにより、カメラ 170 は、そのカメラコマンドを受け取ると、カメラ 170 が取り込んだ画像（複数の場合もある）をロボット制御システム 110 に通信する。一実施形態では、カメラ 170 は、そのカメラ視野内のシーンの画像を、周期的に又は定義されたトリガー条件に応じて、ロボット制御システム 110 からのカメラコマンドを必要とすることなく、自動的に取り込むことができる。こうした実施形態では、カメラ 170 はまた、ロボット制御システム 110 に、又はより一般的には、ロボット制御システム 110 がアクセス可能な記憶装置に、ロボット制御システム 110 からのカメラコマンドなしに、画像を自動的に通信するように構成することもできる。

10

【0022】

一実施形態では、ロボット制御システム 110 は、ロボット制御システム 110 によって生成されかつロボット 150 に有線又は無線接続を介して通信される移動コマンドを介して、ロボット 150 の移動を制御するように構成することができる。移動コマンドにより、ロボットは、ロボットに配置されたキャリブレーションパターン 160 を移動させることができる。キャリブレーションパターン 160 は、ロボット 150 に永久的に配置することができ、又は、ロボット 150 に取り付けかつロボットから取り外すことができる別個の構成要素とすることができる。

20

【0023】

一実施形態では、ロボット 150 を制御するために使用される唯一の画像は、カメラ 170 によって取り込まれる画像である。別の実施形態では、ロボット 150 は、複数のカメラからの画像によって制御することができる。図 1 B は、ロボット動作システム 100 の一実施形態であるロボット動作システム 100 A を示す。システム 100 A は、カメラ 170 及びカメラ 180 等の複数のカメラを備える。ロボット制御システム 110 は、カメラ 170 及びカメラ 180 の両方から画像を受け取り、2つのカメラ 170、180 からの画像に基づきロボット 150 の移動を制御するように構成することができる。場合により、2つのカメラ 170、180 の存在により、ロボット制御システム 110 に立体視を与えることができる。ロボット制御システム 110 は、より詳細に後述するように、カメラ 170 及びカメラ 180 の両方に対してカメラキャリブレーションを実施するように構成することができる。一実施形態では、ロボット制御システム 110 は、カメラキャリブレーションを実施するために、両方のカメラ 170、180 を制御して、キャリブレーションパターン 160 のそれぞれの画像を取り込むことができる。一実施形態では、ロボット動作システム 100 A は、厳密に2つのカメラを有することができ、又は、3つ以上のカメラを有することができる。

30

40

【0024】

図 1 C は、ロボット制御システム 110 のブロック図を示す。このブロック図に示すように、ロボット制御システム 110 は、制御回路 111 と、通信インターフェース 113 と、非一時的コンピューター可読媒体 115（例えば、メモリ）とを備えることができる。一実施形態では、制御回路 111 は、1つ以上のプロセッサ、プログラマブルロジック回路（PLC）若しくはプログラマブルロジックアレイ（PLA）、フィールドプログラマブルゲートアレイ（FPGA）、特定用途向け集積回路（ASIC）又は他の任意の制御回路を含むことができる。

【0025】

一実施形態では、通信インターフェース 113 は、カメラ 170 及びロボット 150 と

50

通信するように構成されている1つ以上の構成要素を備えることができる。例えば、通信インターフェース113は、有線又は無線プロトコルでの通信を実施するように構成された通信回路を備えることができる。一例として、通信回路としては、RS-232ポートコントローラー、USBコントローラー、Ethernetコントローラー、Bluetooth（登録商標）コントローラー、PCIバスコントローラー、他の任意の通信回路又はそれらの組合せを挙げることができる。

【0026】

一実施形態では、非一時的コンピューター可読媒体115はコンピューターメモリを含むことができる。コンピューターメモリは、例えば、ダイナミックランダムアクセスメモリ（DRAM）、ソリッドステート集積メモリ及び／又はハードディスクドライブ（HDD）を含むことができる。場合により、カメラキャリブレーションは、非一時的コンピューター可読媒体115に記憶されたコンピューター実行可能命令（例えば、コンピューターコード）を通して実施することができる。こうした場合、制御回路111は、コンピューター実行可能命令を実施してカメラキャリブレーション（例えば、図4並びに図9A及び図9Bに示すステップ）を実施するように構成された1つ以上のプロセッサを含むことができる。

【0027】

上述したように、カメラキャリブレーションは、カメラによって取り込まれる画像に基づいてロボットの制御を容易にするために実施することができる。例えば、図2Aは、画像を使用して、倉庫において物体292を拾い上げるようにロボット250を制御する、ロボット動作システム200を示す。より具体的には、ロボット動作システム200は、図1Aのシステム100の一実施形態とすることができ、カメラ270と、ロボット250と、図1Aのロボット制御システム110とを含む。カメラ270は、図1Aのカメラ170の一実施形態とすることができ、ロボット250は、図1Aのロボット150の一実施形態とすることができる。カメラ270は、倉庫内のコンベヤベルト293の上に配置された物体292（例えば、出荷のための包装品）の画像を取り込むように構成することができ、ロボット制御システム110は、物体292を拾い上げるようにロボット250を制御するように構成することができる。

【0028】

図2Aの実施形態では、ロボット250は、ベース252と、ベース252に対して移動可能なロボットアームとを有することができる。より具体的には、ロボットアームは、互いに対して回転可能である複数のリンク254A～254Cと、リンク254Cに取り付けられた把持部255とを備えることができ、ここでは、把持部は、物体を拾い上げるために使用することができる。一実施形態では、ロボット制御システム110は、リンク254A～254Cのうちの1つ以上を回転させる移動コマンドを通信するように構成することができる。移動コマンドは、モーター移動コマンド等の低水準コマンド、又は高水準コマンドとすることができる。ロボット制御システム110からの移動コマンドが高水準コマンドである場合、ロボット150は、高水準コマンドを低水準コマンドに変換するように構成することができる。

【0029】

一実施形態では、カメラキャリブレーションの目的のうちの1つは、カメラ270とロボット250との関係、又はより具体的には、カメラ270と、ロボット250のベース252に対して固定である基準点294との関係を求めることである。言い換えれば、キャリブレーション情報は、カメラ270と基準点294との関係を記述する情報を含むことができる。一実施形態では、この関係は、基準点294に対するカメラ270の位置とともに、ロボット250の基準向きに対するカメラ270の向きを指すことができる。一実施形態では、基準向きは、より詳細に後述するように、ワールド座標系を定義するために使用することができ、上記関係は、カメラワールド関係と呼ぶことができる。場合により、カメラワールド関係は、カメラ270と物体292との関係（カメラ物体関係とも呼ぶ）と、物体292と基準点294との関係（物体ワールド関係とも呼ぶ）とを

10

20

30

40

50

求めるために使用することができる。カメラー物体関係及び物体ーワールド関係を使用して、物体 292 を拾い上げるようにロボット 250 を制御することができる。例えば、ロボット制御システム 110 は、カメラー物体関係、物体ーワールド関係、カメラーワールド関係又はそれらの組合せに基づいて、物体 292 に対する把持部 255 又はリンク 254C の位置及び向き（例えば、リンカー物体関係）を求めるように構成することができる。

【0030】

一実施形態では、カメラキャリブレーションは、固有キャリブレーションフェーズ及びハンドーアイキャリブレーションフェーズを含む。図 2B は、固有キャリブレーションフェーズ及びハンドーアイキャリブレーションフェーズから求められる情報の一例を示し、カメラキャリブレーションを実施するために使用されるキャリブレーションパターン 260 を更に示す。一実施形態では、キャリブレーションパターン 260 は、リンク 254C に直接かつ固定して取り付けることができ、それにより、キャリブレーションパターン 260 はリンク 254C に対して固定のままである。固有キャリブレーションフェーズは、カメラ 270 の固有カメラパラメーターに対してそれぞれの推定値を自動的に求めることを含むことができる。一実施形態では、カメラ 270 の固有カメラパラメーターは、値がカメラ 270 の位置及び向きとは独立している任意のパラメーターとすることができる。より詳細に後述するように、固有カメラパラメーターは、カメラ 270 の焦点距離、カメラの画像センサーのサイズ、又はカメラ 270 によって導入されるレンズ歪みの影響等、カメラ 270 の特性を特徴付けることができる。一実施形態では、ハンドーアイキャリブレーションフェーズは、カメラーワールド関係及びキャリブレーションパターン 260 とリンク 254C との関係（パターンーリンク関係とも呼ぶ）、又はより具体的には、キャリブレーションパターン 260 とリンク 254C 上の基準点 296 との関係を自動的に求めることを含むことができる。一実施形態では、カメラーワールド関係及びパターンーリンク関係は、カメラ 270 とパターン 260 との関係（カメラーパターン関係とも呼ぶ）と、リンク 254C と基準点 294 との関係（リンカーワールド関係とも呼ぶ）とに基づいて求めることができる。場合により、カメラーパターン関係は、固有キャリブレーションの結果に基づいて求めることができ、リンカーワールド関係は、ロボット制御システム 110 がロボット 250 に通信した移動コマンドに基づいて求めることができる。一実施形態では、カメラキャリブレーションは、複数のカメラを備えるシステムに対するステレオキャリブレーションフェーズを含むことができる。ステレオキャリブレーションフェーズは、1 つのカメラの別のカメラの位置及び向きに対する位置及び向き等、複数のカメラの間の関係を求めることを含むことができる。

【0031】

一実施形態では、カメラの固有カメラパラメーターは、カメラの外部の物体がその画像センサー上に画像としていかに投影されるかと、レンズが画像において物体の外観をいかに歪めるか等を記述することができる。例えば、図 3A は、1 つ以上のレンズ 371 と、画像センサー 373 と、通信インターフェース 375 とを備える、図 1A のカメラ 170 及び図 2A のカメラ 270 の一実施形態であるカメラ 370 のブロック図を示す。通信インターフェース 375 は、図 1A のロボット制御システム 110 と通信するように構成することができる。一実施形態では、1 つ以上のレンズ 371 は、カメラ 370 の外側から入ってくる光を画像センサー 373 上に集束させることができる。一実施形態では、画像センサー 373 は、それぞれのピクセル強度値を介して画像を表すように構成されたピクセルのアレイを含むことができる。画像センサー 373 は、電荷結合素子（CCD）センサー、相補型金属酸化膜半導体（CMOS）センサー、量子イメージセンサー（QIS: quanta image sensor）又は他の任意の画像センサーを含むことができる。

【0032】

上述したように、固有カメラパラメーターは、カメラ 370 の視野（そのカメラ視野とも呼ぶ）内の物体が、画像センサー上に像としていかに投影されるか、又はより具体的に

は、物体が配置されている様々な位置が画像センサーのピクセルアレイ上にいかに投影されるかを記述することができる。例えば、図 3 Bは、カメラ 3 7 0 Aの外部の位置

【数 1】

$$[X\ Y\ Z]_{Camera}^T$$

を示し、ここで、Tという上付き文字は転置を指し、C a m e r aという下付き文字は、カメラ座標系において表現されているものとしてのX、Y及びZ座標を指す。より具体的には、カメラ 3 7 0 Aは、カメラ 3 7 0の一実施形態とすることができ、1つ以上のレンズ 3 7 1 A及び画像センサー 3 7 3 Aを備えることができる。カメラ 3 7 0 Aの位置及び向きは、カメラ座標系を定義するために使用することができる。図 3 Bは、カメラ座標系を直交座標軸

10

【数 2】

$$\vec{X}_{camera}, \vec{Y}_{camera}, \vec{Z}_{camera}$$

によって定義されるように示す。座標軸は、カメラ 3 7 0 Aの様々な構成要素の向きと位置合わせすることができる。例えば、

【数 3】

$$\vec{Z}_{camera}$$

座標軸は、1つ以上のレンズ 3 7 1 Aの光軸と等しくすることができる、カメラ 3 7 0 Aのカメラ視野の中心軸と等しくすることができる。場合により、

20

【数 4】

$$\vec{X}_{camera}$$

及び

【数 5】

$$\vec{Y}_{camera}$$

座標軸は、画像センサー 3 7 3 Aの縁に対して平行とすることができる。さらに、カメラ座標系の原点は、1つ以上のレンズ 3 7 1 Aのうちの1つのレンズの位置、カメラ 3 7 0 Aの絞りの位置、又は別の位置（例えば、画像センサー 3 7 3 Aの上、正面又は後方の位置）と等しくすることができる。

30

【0 0 3 3】

一実施形態では、位置

【数 6】

$$[X\ Y\ Z]_{Camera}^T$$

からの光は、カメラ内の座標

【数 7】

$$[-\frac{X}{f} \ -\frac{Y}{f} \ -f]_{Camera}^T$$

40

の上に投影することができ、ここで、fは、1つ以上のレンズ 3 7 1 Aの焦点距離である。カメラ座標系におけるこの座標はまた、画像センサー座標系におけるピクセル座標

【数 8】

$$[u\ v]_{Sensor}^T$$

にも対応することができる。図 3 Bは、画像センサー 3 7 3 Aのそれぞれの縁と位置合わせすることができる座標軸

【数 9】

$$\vec{U}_{sensor}, \vec{V}_{sensor}$$

によって定義されるように画像センサー座標系を示す。画像センサー座標系は、画像センサー 373A の角に位置する原点を有することができる。

【0 0 3 4】

一実施形態では、固有カメラパラメーターは、スカラー値、ベクトル又は行列である値を有することができる。一実施形態では、固有カメラパラメーターのうちの 1 つは、位置

【数 10】

$$[X\ Y\ Z]_{Camera}^T$$

と位置

【数 11】

$$[u\ v]_{Sensor}^T$$

との幾何学的関係をモデル化する射影行列 K である。この固有カメラパラメーターの推定値は推定された行列とすることができ、それは、行列の成分のそれぞれの推定された値を含むことができる。場合により、より詳細に後述するように、射影行列 K は、

【数 12】

$$[X\ Y\ Z]_{Camera}^T$$

と

【数 13】

$$[u\ v]_{Sensor}^T$$

との歪みなし関係をモデル化することができ、別の固有カメラパラメーター又は一組の固有カメラパラメーターは、レンズ歪みの影響を考慮することができる。一実施形態では、

【数 14】

$$K = \begin{bmatrix} f_x & 0 & C_x \\ 0 & f_y & C_y \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

及び

【数 15】

$$[u\ v\ 1]_{Sensor}^T = K[X/Z\ Y/Z\ 1]_{Camera}^T$$

である。この例では、 f_x は、焦点距離 f と、

【数 16】

$$\vec{U}_{sensor}$$

軸に沿った画像センサー 373A のピクセルサイズとに基づく第 1 のスケールファクターとすることができる。同様に、 f_y は、カメラ 370A の焦点距離 f と、

【数 17】

$$\vec{V}_{sensor}$$

軸に沿った画像センサー 373A のピクセルサイズとに基づく第 2 のスケールファクターとすることができる。 f_x 及び f_y はともに、ピクセル／ミリメートルの単位を有することができる。値 C_x は、主点オフセットの第 1 の部分とすることができ、画像センサー座標系の原点とカメラ座標系の原点との間の

10

20

30

40

【数 1 8】

$$\vec{U}_{sensor}$$

軸に沿った距離に基づくことができる。値 C_y は、主点オフセットの第 2 の部分とすることができ、画像センサー座標系の原点とカメラ座標系の原点との間の

【数 1 9】

$$\vec{V}_{sensor}$$

軸に沿った距離に基づくことができる。上述したように、射影行列 K は、固有カメラパラメーターであり、 f_x 、 f_y 、 C_x 及び C_y の各々は行列の成分であり、成分の各々はス
10
カラー値を有する。一実施形態では、 f_x 、 f_y 、 C_x 、 C_y の各々及び焦点距離 f もまた、固有カメラパラメーターとみなすことができ、それらの固有カメラパラメーターの各々の値はスカラー値である。

【0 0 3 5】

一実施形態では、固有カメラパラメーターは、1 つ以上のレンズ 3 7 1 A によってもたらされるレンズ歪みの影響を特徴付けることができる 1 つ以上の歪みパラメーターを含む。一実施形態では、固有カメラパラメーターは、歪み関数におけるパラメーターとすることができ。例えば、1 つ以上のレンズ 3 7 1 A のレンズ歪みは、位置

【数 2 0】

$$[X Y Z]_{Camera}^T$$

20

が、

【数 2 1】

$$[\hat{X} \hat{Y} Z]_{Camera}^T$$

にあるかのように見えるようにする効果としてモデル化することができ、ここで、第 1 の関数 d_x （第 1 の歪み関数と呼ぶことができる）が、

【数 2 2】

$$\hat{X}$$

30

を X 、 Y 及び Z の値に関連付けることができ、第 2 の関数 d_y （第 2 の関数とも呼ぶ）が、

【数 2 3】

$$\hat{Y}$$

を X 、 Y 及び Z の値に関連付けることができる。例えば、1 つのモデルでは、

【数 2 4】

$$d_x = \hat{X} = \frac{X}{Z} (1 + k_1 r^2 + k_2 r^4 + k_3 r^6) + 2p_1 \frac{XY}{Z^2} + p_2 (r^2 + 2(\frac{X}{Z})^2)$$

であり、式中、

40

【数 2 5】

$$r^2 = (\frac{X}{Z})^2 + (\frac{Y}{Z})^2$$

である。この例では、 k_1 、 k_2 、 k_3 、 p_1 、 p_2 の各々は、スカラー値を有する歪みパラメーターとすることができ、特定の歪みパラメーターの推定値は、推定されたスカラー値とすることができ。さらに、推定値は、一組の歪みパラメーター（例えば、 k_1 、 k_2 、 k_3 、 p_1 、 p_2 ）に対して求めることができ、一組の歪みパラメーターの推定値は、一組の歪みパラメーターに対する一組のそれぞれの推定されたスカラー値を指す。

【0 0 3 6】

上述したように、カメラキャリブレーションは、カメラとカメラの環境との関係、又は

50

、キャリブレーションパターンとパターンの環境との関係を求める、ハンドーアイキャリブレーションフェーズを含むことができる。ハンドーアイキャリブレーションについては、より詳細に後述する。一実施形態では、外部パラメーターは、図 2 B に示すカメラワールド関係及びパターンーリンク関係を記述することができる。一実施形態では、カメラワールド関係は、カメラ座標系とワールド座標系との関係を記述する変換関数を介して記述することができる。ワールド座標系は、図 3 C に示され、座標軸

【数 2 6】

$$\vec{X}_{World}, \vec{Y}_{World}, \vec{Z}_{World}$$

によって定義される。ワールド座標系の原点は、基準点 3 9 4 であり、基準点 3 9 4 は、ロボット 3 5 0 のベース 3 5 2 に対して固定である任意の点とすることができる。一実施形態では、軸

【数 2 7】

$$\vec{X}_{World}, \vec{Y}_{World}, \vec{Z}_{World}$$

は、任意の向きを有することができる。一実施形態では、軸

【数 2 8】

$$\vec{X}_{World}, \vec{Y}_{World}, \vec{Z}_{World}$$

は、ロボット 3 5 0、又はロボット 3 5 0 が位置する環境（例えば、倉庫）の構造に対して、定義することができる。例えば、軸

【数 2 9】

$$\vec{Z}_{World}$$

は、倉庫の床に対して直交していなければならない場合がある。一実施形態では、上記変換関数は、カメラ座標系からワールド座標系への線形変換を定義する行列

【数 3 0】

$$T_{World}^{Camera}$$

とすることができる。上記

【数 3 1】

$$T_a^b$$

という命名は、座標系「b」における座標から座標系「a」における座標への写像を定義する b-a 変換に対する変換行列を指す。1 つの例では、

【数 3 2】

$$T_a^b$$

は、形式

【数 3 3】

$$T_a^b = \begin{bmatrix} R_{ba} & t_{ba} \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$$

を有する。

【0 0 3 7】

上記例では、 R_{ba} は、座標系 b と座標系 a との間の相対的な回転行列であり、 t_{ba} は、座標系 b と座標系 a との間の相対的な並進ベクトルである。

【0 0 3 8】

一実施形態では、パターンーリンク関係は、パターン座標系とリンク座標系との関係を記述する変換関数を介して記述することができ、その例を図 3 C に示す。一実施形態では、キャリブレーションパターン 3 6 0 は、カメラキャリブレーションを実施するために使

10

20

30

40

50

用することができ、ロボット 350 のリンク 354 に取り付けることができ、リンク 354 は、ロボット 350 のロボットアームの少なくとも一部を形成することができる。パターン座標系は、キャリブレーションパターン 360 に関して定義される座標系とすることができる。例えば、パターン座標系は、座標軸

【数 34】

$$\vec{X}_{Pattern}, \vec{Y}_{Pattern}, \vec{Z}_{Pattern}$$

によって定義することができ、キャリブレーションパターン 360 の中心に位置する原点を有することができる。一実施形態では、キャリブレーションパターン 360 は、平坦な矩形ボード又は平坦な矩形シート（例えば、ステッカー）から形成することができ、

【数 35】

$$\vec{X}_{Pattern}, \vec{Y}_{Pattern}$$

は、平坦ボード又は平坦シートのそれぞれの縁に対して平行とすることができ、

【数 36】

$$\vec{Z}_{Pattern}$$

は、平坦ボード又は平坦シートに対して直交している。図 3C はまた、座標軸

【数 37】

$$\vec{X}_{link}, \vec{Y}_{link}, \vec{Z}_{link}$$

によって定義することができるリンク座標系も示す。一実施形態では、リンク座標系の原点は、リンク 354 の点 396 である。リンク 354 は、キャリブレーションパターン 360 に固定して取り付けることができ、それにより、キャリブレーションパターン 360 は、リンク 354 に対して固定である。一実施形態では、座標軸

【数 38】

$$\vec{X}_{link}, \vec{Y}_{link}, \vec{Z}_{link}$$

の向きは、リンク 354 の向きと同じとすることができる。一実施形態では、パターンーリンク関係に対する変換関数は、パターン座標系とリンク座標系との間の線形変換を定義する行列

【数 39】

$$T_{Link}^{Pattern}$$

とすることができる。一実施形態では、

【数 40】

$$T_{Link}^{Pattern}$$

は、ハンドーアイキャリブレーションフェーズを実施する前には未知である可能性があり、ハンドーアイキャリブレーションフェーズは、カメラワールド関係（例えば、

【数 41】

$$T_{World}^{Camera}$$

）の推定値とともに、

【数 42】

$$T_{Link}^{Pattern}$$

の推定値を求めることを含むことができる。

【0039】

より詳細に後述するように、ハンドーアイキャリブレーションフェーズの幾つかの実施

10

20

30

40

50

形態は、カメラパターン関係及びリンクワールド関係に基づいて、カメラワールド関係及びパターンリンク関係を求めることができる。一実施形態では、カメラパターン関係は、カメラ座標系とパターン座標系との間の線形変換を定義する行列

【数 4 3】

$T_{Pattern}^{Camera}$

によって定義することができる。一実施形態では、リンクワールド関係は、リンク座標系とワールド座標系との間の線形変換を定義する行列

【数 4 4】

T_{World}^{Link}

10

によって定義することができる。

【0 0 4 0】

或るロボットが2つ以上のカメラからの画像に基づいて制御される一実施形態では、カメラキャリブレーションは、第1のカメラ（例えば、図1Bにおけるカメラ1）のカメラ座標系と第2のカメラ（例えば、図1Bにおけるカメラ2）のカメラ座標系との関係を記述する変換関数を推定するか又は他の方法で求める、ステレオキャリブレーションフェーズを含むことができる。一実施形態では、こうした変換関数は、2つのカメラ座標系の間の線形変換を定義する行列

【数 4 5】

20

$T_{Camera\ 2}^{Camera\ 1}$

とすることができる。

【0 0 4 1】

上述したように、カメラキャリブレーションは、キャリブレーションパターンがカメラによって撮影される位置及び／又は向きを求めることを含むことができ、結果として得られる画像は、固有キャリブレーション、ハンドーアイキャリブレーション及び／又はステレオキャリブレーションを実施するために使用される。例えば、キャリブレーションパターンは、カメラのカメラ視野内に収まる仮想立方体の上に又は仮想立方体を通して分散される複数の位置まで移動させることができる。図4は、カメラキャリブレーションを実施するためのキャリブレーションパターンの画像（キャリブレーション画像とも呼ぶ）を得る方法400を示すフロー図を示す。一実施形態では、方法400は、図1Aのロボット制御システム110の図1Aの制御回路111によって実施される。上述したように、ロボット制御システム110は、ロボットアーム及びカメラと通信するように構成された通信インターフェースを備えることができる。

30

【0 0 4 2】

図5Aに、方法400が実施される環境例を示し、図5Aは、カメラ470及びロボット450と通信する図1Aのロボット制御システム110を含むロボット動作システム500を示す。カメラ470は、図1A／図2A／図3Aのカメラ170／270／370の一実施形態とすることができ、ロボットは、図1A／図2A／図3Aのロボット150／250／350の一実施形態とすることができ、ロボット450は、ベース452とベース452に対して移動可能なロボットアームとを備えることができる。ロボットアームは、リンク454A～リンク454E等、1つ以上のリンクを備える。一実施形態では、リンク454A～454Eは、互いに回転可能に取り付けることができる。例えば、リンク454Aは、ジョイント456Aを介してロボットベース452に回転可能に取り付けることができる。残りのリンク454B～454Eは、ジョイント456B～456Eを介して互いに回転可能に取り付けることができる。一実施形態では、リンク（例えば、454B～454E）は、1つ以上の直動ジョイントのみを介して、又は直動ジョイントを他のタイプのジョイント（例えば、1つ以上の円筒ジョイント）と組み合わせて、接続することができる。1つ以上の直動ジョイントを含むこうした実施形態では、リンクは、

40

50

互いに直線的に取り付けられているとすることができる。一実施形態では、ベース 452 は、ロボット 450 を、例えば、取付フレーム又は取付面（例えば、倉庫の床）に取り付けるために使用することができる。一実施形態では、ロボット 450 は、リンク 454A～454E を回転させることによりロボットアームを移動させるように構成されている複数のモーターを備えることができる。例えば、モーターのうちの 1 つは、図 5A において点線矢印によって示すように、ジョイント 456A 及びベース 402 に対して第 1 のリンク 454A を回転させるように構成することができる。同様に、複数のモーターのうちの他のモーターは、リンク 454B～454E を回転させるように構成することができる。複数のモーターは、ロボット制御システム 110 によって制御することができる。図 5A は、第 5 のリンク 454E に固定して配置されたキャリブレーションパターン 460 を更に示し、それにより、リンク 454A～454E の回転又はロボット 450 の他の移動により、リンク 454E に対してキャリブレーションパターン 460 の位置も向きも変化しない。一実施形態では、リンク 454E の上にキャリブレーションパターン 460 を塗装することができる。一実施形態では、キャリブレーションパターン 460 は、リンク 454E に取り付けられているキャリブレーションボードの一部とすることができる。

【0043】

図 4 に戻ると、方法 400 は、一実施形態において、ステップ 401 で開始することができ、そこでは、制御回路 111 は、カメラ視野内に収まる（例えば、完全に収まる）仮想立方体の全ての角位置を求めることができ、カメラ視野はカメラの視野を指すことができる。図 5B は、カメラ 470 の視野とすることができる、カメラ視野例 510 を示し、カメラ視野 510 内に収まる仮想立方体 550 を更に示す。一実施形態では、カメラ視野 510 は、カメラ 470 から外向きに広がる仮想ピラミッドを形成することができる。場合により、カメラ視野 510 の幅は、カメラ 470 の 1 つ以上のレンズの焦点距離によって決まる可能性がある。図 5C は、仮想立方体 550 の角位置の一例を示す。より具体的には、仮想立方体 550 は、仮想立方体 550 の 8 つの角に対応する 8 つの角位置 551A～551H を有する。一実施形態では、仮想立方体の角位置を求めることは、角位置の座標（例えば、

【数 46】

$$[XYZ]^T_{World}$$

）を求めることを含むことができる。

【0044】

一実施形態では、仮想立方体 550 は空間を画定することができ、その空間の上又は中で、ロボット 450 のロボットアームがキャリブレーションパターン 460 を移動させる。カメラ 470 は、仮想立方体 550 の上又は中の種々の位置に対応するキャリブレーションパターン 460 の複数の画像（キャリブレーション画像とも呼ぶ）を取り込むことができる。キャリブレーションパターン 460 は、球体等の異なる形状によって画定される空間を通して移動させることができるが、仮想立方体 550 によって画定される空間は、カメラ 470 のカメラ視野 510 の周縁部に近い方の位置を含むことができる。例えば、仮想立方体 550 の 8 つの角位置は、カメラ視野 510 の周縁部に近い可能性がある。カメラ 470 が、レンズ歪み又は他の形態のカメラ歪みを示す場合、キャリブレーション画像に対するレンズ歪みの影響は、例えば、キャリブレーションパターン 460 がカメラ視野 510 の中心の周囲に位置する場合と比較して、キャリブレーションパターン 460 がカメラ視野 510 の周縁部の近くに位置する場合、より顕著である可能性がある。したがって、仮想立方体 550 は、歪みの影響がより顕著であるキャリブレーション画像の取得を容易にすることができ、それにより、カメラキャリブレーションは、カメラ 470 の歪みパラメーターに対してより正確な推定値を生成することができる。

【0045】

図 4 に戻ると、方法 400 はステップ 403 を更に含むことができ、そこでは、制御回路 111 は、仮想立方体の上に又は仮想立方体を通して分散される複数の位置を求めるこ

とができ、キャリブレーションパターンは、複数の位置の各位置において少なくとも部分的にカメラに可視である。

【0046】

一実施形態では、複数の位置は、仮想立方体の上に又は仮想立方体を通して一様に分散されている（均一に分散されているとも言う）。一実施形態では、複数の位置は、仮想立方体の上に又は中に一様に分散されている厳密に n^3 個の位置とすることができ、 n は、2以上であるか又は3以上である正の整数である。例えば、図5Cは、仮想立方体550の上に又は仮想立方体を通して一様に分散されている厳密に27個の位置の一実施形態を示す。一実施形態では、複数の一様に分散された位置は、複数の位置のうちの隣接する位置の間に、仮想立方体の縁に沿って測定される、一様な間隔を有する。例えば、角位置551Aは、位置551I～551Nに対する隣接する位置とすることができる。角位置551A及び隣接する位置551I～551Nは、仮想立方体550の縁に沿って測定される、一様な間隔を有することができる。より具体的には、角位置551Aは、隣接する位置551I～551Nの各々まで、縁553A、553B又は553Cに沿って測定される、同じ距離を有することができる。この距離は、例えば、仮想立方体550の各辺の長さの半分とすることができる。別の実施形態では、仮想立方体550は、 n^3 個のより小さい、オーバーラップしない立方体（例えば、27個のより小さい立方体）に分割することができ、より小さい立方体は、仮想立方体550を一様に分割する。こうした実施形態では、複数の一様に分散された位置のうちの各位置は、それぞれのより小さい立方体の中心位置とすることができる。

【0047】

一実施形態では、複数の位置は、仮想立方体550を通してランダムに分散される。場合により、制御回路111は、仮想立方体550を複数のオーバーラップしない領域に分割することにより、かつ、複数のオーバーラップしない領域のうちの各領域にあるように複数の位置のうちのそれぞれの位置を割り当てることにより、複数の位置を求めるように構成され、特定の領域におけるそれぞれの位置は、その領域におけるランダムな位置とすることができる。場合により、制御回路111は、再帰的に又は反復的に、半分の領域の各々をより小さい半分の領域に分割し、異なる半分領域に位置を割り当てるように構成することができ、それにより、複数の位置は、仮想立方体550の1つの領域の周囲に密集しない。

【0048】

例えば、制御回路は、一連の反復にわたり複数の位置を求めるように構成することができ、複数の位置のうちの第1の位置は、仮想立方体内の任意の位置として求められ、一連の反復のうちの第1の反復の間に求められ、仮想立方体は、第1の反復を実施するために使用される第1の領域を形成する。図5Dは、第1の反復において求められる第1の位置555Aの一例を示す。この例では、残りの反復に対するそれぞれの位置は、残りの反復の各々に対して以下を実施することにより求められる。すなわち、(a) 先行する反復を実施するために使用された領域を、オーバーラップしない第1の領域及び第2の領域に分割し、第1の領域及び第2の領域の各々は、現反復を実施するために使用される領域であり、(b) 第1の領域及び第2の領域のうちのいずれが先行する位置を含むかを判断し、先行する位置は、先行する反復において求められた複数の位置のうちのそれぞれの位置であり、(c) 現位置として、第1の領域及び第2の領域のうちの他方の内部の任意の位置を求め、現位置は、現反復に対して求められる複数の位置のうちの位置である。例えば、図5Dは、先行する反復（すなわち、第1の反復）で使用された領域を第1の半分領域553A及び第2の半分領域553Bに分割する第2の反復を示す。さらに、第1の反復に対する位置は第1の半分領域553Aにあるため、第2の反復に対する位置は、他方の第2の反復領域553Bにある。図5Eは、先行する反復で使用された領域553Aを第1の反復領域553C及び第2の反復領域553Dに分割する第3の反復を示す。さらに、先行する反復からの位置555Aが半分領域553Dにあったため、第3の反復に対する位置555Cは、他方の半分領域553Cにある。図5Fは、先行する反復で使用された

領域 5 5 3 B を半分領域 5 5 3 E 及び 5 5 3 F に分割する第 4 の反復を示す。先行する反復からの位置は半分領域 5 5 3 F にあったため、第 4 の反復に対する位置 5 5 5 D は他方の半分領域 5 5 3 E にある。

【0049】

図 4 に戻ると、方法 400 はステップ 405 を含み、そこでは、制御回路 111 は、ロボットアームを制御して、ステップ 403 で求められた複数の位置までキャリブレーションパターンを移動させることができる。例えば、図 5 B に関して、ロボット 450 は、ロボットアームのリンク 454 A ～ 454 E のうちの 1 つ以上を移動させることにより、ロボットアームを移動させることができる。制御回路 111 は、例えば、ロボットに対して複数のリンク 454 A ～ 454 E を移動させる 1 つ以上の移動コマンドを生成し、通信インターフェース 113 を介して 1 つ以上の移動コマンドをロボット 450 に出力することができる。より具体的には、制御回路 111 は、1 つ以上の移動コマンドを通信インターフェース 113 に出力することができ、通信インターフェース 113 は、ロボットアーム（例えば、複数のリンク 454 A ～ 454 E）に対して、1 つ以上の移動コマンドに基づき、仮想立方体の上に又は仮想立方体を通して分散されている複数の位置までキャリブレーションパターンを移動させるように、ロボット 450 に 1 つ以上の移動コマンドを通信することができる。一実施形態では、1 つ以上の移動コマンドは、リンク 454 A ～ 454 E が互いに対して回転する回転の量を制御する 1 つ以上のモーターコマンドを含むことができる。一実施形態では、制御回路は、デカルト座標

【数 47】

$$[XYZ]^T_{World}$$

として位置を求め、このデカルト座標に基づきモーターコマンドを決定するように構成することができる。一実施形態では、制御回路 111 は、ロボットアームを（例えば、ロボット 450 に通信される移動コマンドを介して）制御して、仮想立方体 550 の上に又は仮想立方体 550 を通して分散されている複数の位置に対して、カメラ 470 に対する異なるそれぞれの角度にキャリブレーションパターン 460 を傾けさせるように構成することができる。それにより、複数のそれぞれのキャリブレーション画像は、カメラ 470 に対して異なるそれぞれの角度でキャリブレーションパターン 460 を取り込む。

【0050】

一実施形態では、方法 400 はステップ 407 を含み、そこでは、制御回路 111 は、通信インターフェース 113 を介してカメラ 470 から複数のキャリブレーション画像を取得するか又は他の方法で受け取ることができ、複数のキャリブレーション画像は、カメラによって取り込まれ、ステップ 403 及び 405 の複数の位置におけるキャリブレーションパターン 460 のそれぞれの画像である。場合により、ステップ 407 は、制御回路が、複数の位置に配置されているキャリブレーションパターンに対応する複数のそれぞれのキャリブレーション画像を取り込むようにカメラを制御することを含むことができる。例えば、図 6 A ～ 図 6 D は、カメラ 470 に対する異なる位置及び／又は異なるそれぞれの角度における図 5 A のキャリブレーションパターン 460 の 4 つのそれぞれの画像の一例を示す。場合により、複数のそれぞれのキャリブレーション画像の各キャリブレーション画像は、それぞれのピクセル強度値を有するピクセルのアレイを含むことができる。一実施形態では、キャリブレーション画像のうちの 1 つ以上は、キャリブレーションパターンの実際には直線である要素において又は要素の間で湾曲して現れる可能性がある歪みを示す場合がある。歪みについては、図 8 B に関してより詳細に後述する。

【0051】

一実施形態では、ステップ 407 は、制御回路が、カメラコマンドを生成し、そのカメラコマンドを、通信インターフェース 113 を介してカメラに通信することにより、キャリブレーション画像を取得することを含むことができる。カメラコマンドは、カメラによって受け取られると、カメラに対し、カメラ視野からキャリブレーション画像若しくは他の任意の画像を取り込ませ、及び／又は、カメラに対し、取り込んだ画像を通信インター

フェース 1 1 3 に戻すように通信させることができ、それにより、通信インターフェース 1 1 3 は、取り込まれた画像を制御回路 1 1 1 に通信することができる。したがって、その結果、制御回路 1 1 1 は、通信インターフェース 1 1 3 を介してカメラから、取り込まれたキャリブレーション画像を受け取ることができる。一実施形態では、制御回路 1 1 1 は、カメラコマンドを生成することなく、カメラから、取り込まれた画像を受け取ることができる。例えば、カメラは、制御回路 1 1 1 からのカメラコマンドを必要とすることなく、周期的に又は定義されたトリガー条件に応じて、そのカメラ視野からキャリブレーション画像又は他の任意の画像を自動的に取り込むことができる。こうした実施形態では、カメラはまた、制御回路 1 1 1 からのカメラコマンドなしに、自動的に、キャリブレーション画像を通信インターフェース 1 1 3 に通信するように構成することもでき、そのため、通信インターフェース 1 1 3 は、画像を制御回路 1 1 1 に通信することができる。

10

【0052】

図 4 に戻ると、方法 400 はステップ 409 を含み、そこでは、制御回路 1 1 1 は、複数のそれぞれのキャリブレーション画像に基づき、固有カメラパラメータのそれぞれの推定値を求めることができる。方法 400 はステップ 411 を更に含み、そこでは、制御回路 1 1 1 は、固有カメラパラメータのそれぞれの推定値に基づき、カメラ座標系とワールド座標系との関係を記述する変換関数の推定値を求める。一実施形態では、ステップ 409 及び 411 は、固有キャリブレーションフェーズ及びハンドアイキャリブレーションフェーズの一部とすることができ、それらについてはより詳細に後述する。一実施形態では、方法 400 はステップ 413 を含むことができ、そこでは、制御回路は、カメラから後続する画像を受け取り、後続する画像に基づきかつ変換関数の推定値に基づく後続する移動コマンドを（例えば、通信インターフェース 1 1 3 を介して）ロボットに出力することにより、ロボットアームの配置を制御する。例えば、後続する画像は、カメラによって取り込まれた（例えば、自動的に又はカメラコマンドに応じて取り込まれた）包装品又は他の物体の画像とすることができ、1 つの例では、ステップ 413 は、変換関数及び後続する画像を用いて物体－ワールド関係（例えば、行列

20

【数 48】

$$T_{\text{WORLD}}^{\text{OBJECT}}$$

）を求めることを含むことができ、この関係を使用して、包装品に対するロボットアーム又はロボットの他の構成要素の配置を制御する移動コマンドを生成することができる。

30

【0053】

一実施形態では、（仮想立方体の上に又は仮想立方体を通して分散された位置までキャリブレーションパターンを移動させる）ステップ 405 において使用される仮想立方体は、カメラ視野（例えば、510）内に収まる（例えば、完全に収まる）ことができる最大仮想立方体とすることができる。一実施形態では、ステップ 405 において、仮想立方体の全ての角位置までロボットアームがキャリブレーションパターンを移動させることができる場合（例えば、そうした場合にのみ）、最大仮想立方体が使用される。そうでない場合、ステップ 405 に対して、より小さい仮想立方体を使用することができる。例えば、方法 400 の 1 つの実施形態では、ステップ 401 は、ステップ 405 の前に実施され、制御回路 1 1 1 が、カメラのカメラ視野内に収まる第 1 の仮想立方体を求めることを含む。図 7 は、第 1 の仮想立方体 649 の一例を示し、それは、場合により、カメラのカメラ視野に収まることのできる最大仮想立方体とすることができる。その場合、制御回路 1 1 1 は、（例えば、ロボット 450 の）ロボットアームが第 1 の仮想立方体の全ての角位置までキャリブレーションパターンを移動させることができるか否かを判断することができる。ロボットアームがそのようにすることができる場合、ステップ 403 及び 405 において仮想立方体として、第 1 の仮想立方体を使用することができる。

40

【0054】

場合により、制御回路 1 1 1 は、ロボットアームが、第 1 の仮想立方体 649 の 1 つ以上の角位置までキャリブレーションパターンを移動させることができないと判断する場合

50

がある。例えば、制御回路 111 は、ロボットアームが、第 1 の仮想立方体 649 の 6 つの角位置までしかキャリブレーションパターンを移動させることができないと判断する場合があります、第 1 の仮想立方体 649 の第 7 の角位置又は第 8 の角位置までキャリブレーションパターンを移動させることができない場合がある。こうした判断は、キャリブレーションパターンを第 7 の角位置及び第 8 の角位置の近くに配置することができない可能性を反映する。こうした状況では、第 1 の仮想立方体 649 が、キャリブレーションパターンがカメラによって撮影される位置を求めるために使用される場合、キャリブレーションパターンを第 7 の角位置及び第 8 の角位置の近くに移動させることができないため、カメラは、第 7 の角位置及び第 8 の角位置の近くでキャリブレーションパターンのキャリブレーション画像を取り込むことができない可能性がある。この状況により、カメラキャリブレーションに利用可能なキャリブレーション画像の多様性が低減する可能性があり、それにより、カメラキャリブレーションの精度又はロバスト性が低下する可能性がある。したがって、制御回路 111 は、ロボットアームが第 1 の仮想立方体 649 の少なくとも 1 つの角位置までキャリブレーションパターンを移動させることができないという判断に応じて、第 1 の仮想立方体 649 より小さい（例えば、20% 小さい）第 2 の仮想立方体 650 を求めることができる。ロボットアームが、第 2 の仮想立方体 650 の全ての角位置までキャリブレーションパターンを移動させることができる場合、第 2 の仮想立方体 650 は、ステップ 403 及び 405 の仮想立方体として使用することができる。

【0055】

一実施形態では、制御回路は、ロボットアームが特定の位置までキャリブレーションパターンを移動させることができるか否かを、物理的な物体（例えば、電源ケーブル）がロボットアームからその位置までの経路を妨げているか否かを検出することに基づき、判断することができる。一実施形態では、ロボットアームが、単に到達することができない幾つかの位置がある可能性があり、その理由は、そうした位置が、ロボットのベースから遠すぎるため、又は、ロボットアームがその物理的構造によりその位置まで移動することが妨げられるためである。例えば、ロボットアームは、ロボットアームを構成している 1 つ以上のリンクのサイズ、1 つ以上のリンクの向き、1 つ以上のリンクを接続するジョイントにより何度の自由度が与えられるか、又は他の何らかの制約により、妨げられる可能性がある。一実施形態では、制御回路は、ロボットアームを実際に移動させることなく、上記判断を行うことができる。別の実施形態では、制御回路は、ロボットアームを介して特定の位置までキャリブレーションアームを移動させるように実際に試み、こうした試みが成功するか否かを判断することにより、上記判断を行うことができる。

【0056】

一実施形態では、ステップ 405 に対して、各角位置において、ロボットアームがカメラに対する角度の定義された範囲内にあるようにキャリブレーションパターンを傾けることができる場合、特定の仮想立方体を使用される。場合により、ステップ 405 に対して、上に列挙した条件が満足される場合にのみ、特定の仮想立方体を使用される。例えば、カメラキャリブレーションは、キャリブレーションパターンとカメラとの間の角度が 0 度～45 度の範囲内にあるキャリブレーション画像のみを使用することができる。したがって、一実施形態では、ステップ 401 は、制御回路 111 が、ロボットアームが第 1 の仮想立方体 649 の全ての角位置までキャリブレーションパターンを移動させることができるか否かと、第 1 の仮想立方体 649 の全ての角位置のうちの各角位置において、カメラに対する角度の定義された範囲内にある角度までキャリブレーションパターンを傾けることができるか否かとを判断することを含むことができる。制御回路が、ロボットアームが第 1 の仮想立方体 649 の 1 つ以上の角位置までキャリブレーションパターンを移動させることができないか、又は、ロボットアームが、第 1 の仮想立方体 649 の少なくとも 1 つの角位置において、カメラに対する角度の定義された範囲内にある角度までキャリブレーションパターンを傾けることができないと判断した場合、制御回路 111 は、第 2 の仮想立方体 650 の全ての角位置を求めることができる。上記条件が満足される場合、ステップ 405 に対して、第 2 の仮想立方体 650 を使用することができる。

【0057】

一実施形態では、制御回路111は、キャリブレーションパターンの画像に基づき、焦点パラメーターの値と露出パラメーターの値とを求めるように構成することができる。場合により、この確定は、ステップ401の前に実施することができる。例えば、制御回路111は、ステップ401の前にキャリブレーションパターンの第1のキャリブレーション画像を取り込むようにカメラを制御し、キャリブレーションパターンの少なくとも1つのパターン要素（例えば、ドット）の強度のレベル及びコントラストのレベルを求めるように構成することができる。制御回路111は、第1のキャリブレーション画像におけるパターン要素のうちの少なくとも1つの強度のレベル及びコントラストのレベルのうちの少なくとも一方に基づき、カメラの露出パラメーター（例えば、絞り、シャッタースピード又はISO）及び焦点パラメーターのそれぞれの値を求めるように構成することができる。その場合、これらのパラメーターのそれぞれの値は、カメラが、ステップ407においてキャリブレーションパターンのキャリブレーション画像を取り込むために使用することができる。

10

【0058】

上述したように、カメラキャリブレーションは、キャリブレーションパターン460の画像等、キャリブレーション画像に基づくことができる。一実施形態では、キャリブレーションパターン460は、平坦なキャリブレーションボードに印刷することができる。キャリブレーションボードは、カーボンファイバー等、温度によって誘発される反りに対して耐性がある材料から形成することができる。図8Aは、キャリブレーションパターン460の一例を示し、それは、矩形格子の仮想直線格子線（463₁～463₅及び465₁～465₅）に沿って配置されている複数のパターン要素461₁～461₂₅を含むことができる。例えば、仮想格子線は、一様に間隔を空けて配置された直線463₁～463₅の第1の組と、一様に間隔を空けて配置された直線465₁～465₅の第2の組とを含むことができ、仮想格子線463₁～463₅の第1の組は、仮想格子線465₁～465₅の第2の組に対して直交している。一実施形態では、パターン要素461₁～461₂₅の各々は円形ドットとすることができる。一実施形態では、パターン要素461₁～461₂₅は、サイズが異なる場合がある。例えば、パターン要素461₈、461₁₃及び461₁₄は、第1の直径を有し、残りの全てのパターン要素は、第1の直径より小さい第2の直径を有する。一実施形態では、複数のパターン要素461₁～461₂₅は、定義されたサイズ（複数の場合もある）とそれらの間の定義された間隔とを有する。例えば、第1の直径及び第2の直径は、キャリブレーションパターン460のメーカー（例えば、キャリブレーションボード製造業者）によって定義された値とすることができる。さらに、複数のパターン要素461₁～461₂₅は、格子線465₁～465₅に沿って定義された距離Δd₁を有し、格子線463₁～463₅に沿って定義された距離Δd₂を有することができる。それらの定義された距離は、カメラキャリブレーション中に既知の値とすることができる。一実施形態では、Δd₁はΔd₂に等しい。一実施形態では、パターン要素461₁～461₂₅は、全て同じサイズ（例えば、同じ直径）を有することができる。キャリブレーションパターン460は、キャリブレーションパターン460の向きを示す特徴（例えば、回転非対称形状）を更に含むことができる。

20

30

40

【0059】

上述したように、パターン座標系は、キャリブレーションパターン460等のキャリブレーションパターンに対して定義することができる。一実施形態では、パターン要素461₁₃等、キャリブレーションパターン460の中心にある又は中心に近いパターン要素が、キャリブレーション座標系の原点を定義することができる。この実施形態では、

【数49】

$$\vec{X}_{Pattern}$$

軸は、仮想格子線463₁～463₅に位置合せすることができ、

50

【数 5 0】

$\vec{Y}_{Pattern}$

軸は、仮想格子線 $465_1 \sim 465_5$ に位置合せすることができ、

【数 5 1】

$\vec{Z}_{Pattern}$

軸は、キャリブレーションパターン 460 によって形成された平面に対して直交する。

【0060】

パターン要素は、直線仮想線に沿って配置されているが、レンズ歪みの影響により、キャリブレーション画像では湾曲経路に沿って配置されているように見える可能性がある。例えば、図 8 B は、キャリブレーション画像がレンズ歪みの影響を含む、キャリブレーションパターン 460 に対するキャリブレーション画像の一例を示す。例えば、キャリブレーションパターン 460 におけるパターン要素は、矩形格子の直線に沿って配置されているが、レンズ歪みにより、パターン要素は、湾曲経路に沿って配置されているかのように見える可能性がある。より詳細に後述するように、カメラキャリブレーションは、キャリブレーション画像における湾曲の検出に基づき、1 つの歪みパラメーター又は一組の歪みパラメーターの推定値を求めることができる。

【0061】

上述したように、カメラキャリブレーションの一態様は、後述する固有キャリブレーションフェーズ（固有キャリブレーションの実施とも呼ぶ）を含むことができる。一実施形態では、固有キャリブレーションは、歪みパラメーター及び射影行列等、図 1 A / 図 3 B / 図 5 A のカメラ 170 / 370 / 470 の固有カメラパラメーターに対してそれぞれの推定値を求めることを含むことができる。

【0062】

一実施形態では、射影行列は、値がスカラー値から形成された行列である、固有カメラパラメーターとすることができる。例えば、カメラ 170 / 370 / 470 の射影行列 K は、9 個のスカラー値から構成された 3×3 行列として定義することができる。上述したように、射影行列の一例は以下の通りである。

【数 5 2】

$$K = \begin{bmatrix} f_x & 0 & c_x \\ 0 & f_y & c_y \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

【0063】

一実施形態では、射影行列は、以下のように、カメラのカメラ視野内のパターン要素の座標

【数 5 3】

$[X Y Z]_{Camera}^T$

を、パターン要素がキャリブレーション画像に現れるピクセル座標

【数 5 4】

$[u v]_{Sensor}^T$

に射影する線形変換又は他の写像を定義する。

【数 5 5】

$$\begin{bmatrix} u \\ v \\ 1 \end{bmatrix} = K \begin{bmatrix} X/Z \\ Y/Z \\ 1 \end{bmatrix}$$

【0064】

上記関係は、レンズ歪みがないと想定することができる。上記例では、ベクトル $[X /$

10

20

30

40

50

$\begin{bmatrix} X & Y & Z & 1 \end{bmatrix}^T$ は、カメラ座標系における同次 3 D 座標であり、ベクトル $\begin{bmatrix} u & v & 1 \end{bmatrix}^T$ は、画像センサー座標系における同次 3 D 座標である。

【数 5 6】

一実施形態では、パターン要素のピクセル座標

【数 5 6】

$\begin{bmatrix} u & v \end{bmatrix}_{Sensor}^T$

は、キャリブレーション画像におけるパターン要素の中心の推定値を指すことができる。例えば、パターン要素が、キャリブレーション画像において円形ドットとして現れる場合、ピクセル座標は、円形ドットの中心とすることができる。状況により、パターン要素は、キャリブレーションパターン上では実際には円形ドットであっても、キャリブレーション画像において楕円形として現れる場合がある。このように現れるのは、カメラとキャリブレーションパターンとの間の角度に起因する可能性がある。これらの状況では、パターン要素のピクセル座標は、楕円形の幾何学的中心とはわずかに異なる可能性がある。

【数 5 6】

一実施形態では、 f_x 、 f_y 、 C_x 及び C_y の各々は、射影行列の成分とすることができる。値がスカラー値である固有カメラパラメーターでもあり得る。上述したように、パラメーター f_x 及び f_y は、カメラの焦点距離と X 又は Y 方向における画像センサーのピクセルサイズとに基づくスケールファクターとすることができる。パラメーター C_x 及び C_y は、画像センサー座標系で表される画像中心のピクセル座標とすることができる。

【数 5 6】

一実施形態では、歪みパラメーターは、歪み関数のパラメーターとすることができる。より具体的には、カメラのレンズ歪みは、カメラの視野内の

【数 5 7】

$\begin{bmatrix} X & Y & Z \end{bmatrix}_{Camera}^T$

に実際に位置するパターン要素を、そのパターン要素が

【数 5 8】

$\begin{bmatrix} \hat{X} & \hat{Y} & Z \end{bmatrix}_{Camera}^T$

に位置するかのように見えるようにする、1 つ以上の関数 d_x 及び d_y としてモデル化することができる。このモデルでは、射影行列 K は、

【数 5 9】

$\begin{bmatrix} X & Y & Z \end{bmatrix}_{Camera}^T$

ではなく

【数 6 0】

$\begin{bmatrix} \hat{X} & \hat{Y} & Z \end{bmatrix}_{Camera}^T$

に適用される。この現象は、以下のように表すことができる。

【数 6 1】

$$\begin{bmatrix} u \\ v \\ 1 \end{bmatrix} = K \begin{bmatrix} \hat{X} \\ \hat{Y} \\ 1 \end{bmatrix} = K \begin{bmatrix} d_x(\tilde{X}, \tilde{Y}) \\ d_y(\tilde{X}, \tilde{Y}) \\ 1 \end{bmatrix} = K \begin{bmatrix} d_x(X/Z, Y/Z) \\ d_y(X/Z, Y/Z) \\ 1 \end{bmatrix}$$

【数 6 2】

上記例では、 X/Z 及び Y/Z は、

【数 6 2】

$\tilde{X}$

及び

10

20

30

40

50

【数 6 3】

$\tilde{Y}$

としてより単純に書かれる。非線形歪み関数 d_x が、

【数 6 4】

$\tilde{X}$

及び

【数 6 5】

$\tilde{Y}$

10

の関数として

【数 6 6】

$\hat{X}$

を求めることができ、非線形歪み関数 d_y が、

【数 6 7】

$\tilde{X}$

及び

20

【数 6 8】

$\tilde{Y}$

の関数として

【数 6 9】

$\hat{Y}$

を求めることができる。場合により、固有カメラパラメーターは、歪み関数 d_x 又は d_y におけるパラメーターとすることができ、その場合、固有カメラパラメーターは、歪みパラメーターと呼ぶことができる。

30

【0 0 6 9】

一実施形態では、歪み関数は、多項式歪みモデルに基づくことができ、そこでは、

【数 7 0】

$$\hat{X} = d_x(\tilde{X}, \tilde{Y}) = \tilde{X}(1 + k_1 r^2 + k_2 r^4 + k_3 r^6) + 2p_1 \tilde{X} \tilde{Y} + p_2(r^2 + 2\tilde{X}^2)$$

$$\hat{Y} = d_y(\tilde{X}, \tilde{Y}) = \tilde{Y}(1 + k_1 r^2 + k_2 r^4 + k_3 r^6) + 2p_2 \tilde{X} \tilde{Y} + p_1(r^2 + 2\tilde{Y}^2)$$

である。

【0 0 7 0】

40

上記例では、

【数 7 1】

$$r^2 = \tilde{X}^2 + \tilde{Y}^2$$

である。さらに、この例における固有カメラパラメーターは、 k_1 、 k_2 、 k_3 、 p_1 、 p_2 を含むことができ、それらの各々は、より具体的には、歪みパラメーターと呼ぶことができる。場合により、歪みパラメーターのうちの幾つか又は全てが、スカラー値である値を有することができる。

【0 0 7 1】

一実施形態において、歪み関数は、有理歪みモデルに基づくことができ、そこでは、

50

【数 7 2】

$$\hat{X} = d_x(\tilde{X}, \tilde{Y}) = \tilde{X} \left(\frac{1 + k_1 r^2 + k_2 r^4 + k_3 r^6}{1 + k_4 r^2 + k_5 r^4 + k_6 r^6} \right) + 2p_1 \tilde{X} \tilde{Y} + p_2 (r^2 + 2\tilde{X}^2)$$

$$\hat{Y} = d_y(\tilde{X}, \tilde{Y}) = \tilde{Y} \left(\frac{1 + k_1 r^2 + k_2 r^4 + k_3 r^6}{1 + k_4 r^2 + k_5 r^4 + k_6 r^6} \right) + 2p_2 \tilde{X} \tilde{Y} + p_1 (r^2 + 2\tilde{Y}^2)$$

である。

10

【0 0 7 2】

上記例では、

【数 7 3】

$$r^2 = \tilde{X}^2 + \tilde{Y}^2$$

であり、 k_1 、 k_2 、 k_3 、 k_4 、 k_5 、 k_6 、 p_1 及び p_2 の各々は固有カメラパラメーター、より具体的には歪みパラメーターである。

【0 0 7 3】

一実施形態では、歪み関数は、視野モデルに基づくことができ、そこでは、

【数 7 4】

20

$$\hat{X} = d_x(\tilde{X}) = \frac{\tilde{X} \tan(r \tan(\omega))}{\tan(\omega)}$$

$$\hat{Y} = d_y(\tilde{Y}) = \frac{\tilde{Y} \tan(r \tan(\omega))}{\tan(\omega)}$$

である。

【0 0 7 4】

上記例では、 ω は、固有カメラパラメーター、より具体的には、値がスカラー値である歪みパラメーターである。

30

【0 0 7 5】

より詳細に後述するように、固有キャリブレーションフェーズの幾つかの事例は、歪みパラメーターの推定値を求めることを含むことができ、その推定値は、逆歪み関数

【数 7 5】

$$d_x^{-1}$$

及び

【数 7 6】

$$d_y^{-1}$$

40

に適用される場合、レンズ歪みの影響を補償することができる値とすることができる。例えば、逆歪み関数は、歪みパラメーターの推定値が適用されると、湾曲を示す画像（例えば、図 8 B の画像）を、湾曲を低減させるか又はなくす「無歪み」画像に変換することができる。

【0 0 7 6】

図 9 A 及び図 9 B は、カメラキャリブレーションを実施する方法例 9 0 0 のフロー図を示し、カメラキャリブレーションは、固有キャリブレーションフェーズを含むことができる。本方法は、異なる段階において異なる固有カメラパラメーターの推定された値を求めることができる。方法 9 0 0 は、例えば、図 1 A のロボット制御システム 1 1 0 の図 1 A

50

の制御回路 1 1 1 によって実施することができる。上述したように、ロボット制御システム 1 1 0 は、図 5 A のロボット 4 5 0 等のロボット、及び、カメラ視野 5 1 0 を有する、図 5 A のカメラ 4 7 0 等のカメラと通信することができる。ロボット 4 5 0 は、図 5 A のキャリブレーションパターン 4 6 0 等のキャリブレーションパターンが配置されるロボットアームを有することができる。キャリブレーションパターン 4 6 0 は、図 3 C 及び図 8 A に示すもの等、パターン座標系にそれぞれの定義されたパターン要素位置（例えば、パターン座標）を有する、図 8 A の複数のパターン要素 $461_1 \sim 461_{25}$ を含む。パターン座標系は、キャリブレーションパターン 4 6 0 の位置及び向きに関して定義された座標系とすることができる。例えば、図 8 A に示すように、パターン座標系は、座標軸

【数 7 7】

10

$$\vec{X}_{pattern}$$

、

【数 7 8】

$$\vec{Y}_{pattern}$$

及び

【数 7 9】

$$\vec{Z}_{pattern}$$

20

によって定義される。一実施形態では、パターン要素 461_{13} は、パターン座標系の原点であり、その定義されたパターン要素位置は、パターン座標

【数 8 0】

$$[000]^T_{Pattern}$$

である。この実施形態では、パターン要素 461_{14} の定義されたパターン要素位置は、例えば、

【数 8 1】

$$[d_1 00]^T_{Pattern}$$

30

であり、ここで、 d_1 は、既知である定義された値である。別の例として、パターン要素 461_8 の定義されたパターン要素位置は、

【数 8 2】

$$[0 d_2 0]^T_{Pattern}$$

である。

【0077】

一実施形態では、方法 900 はステップ 901 で開始することができ、そこでは、制御回路 1 1 1 は、ロボットアームを制御して、カメラ視野（例えば、図 5 B の 5 1 0）内の少なくとも 1 つの位置までキャリブレーションパターン（例えば 4 6 0）を移動させることができ、カメラ視野はカメラの視野（例えば、4 7 0）を指することができる。場合により、ステップ 901 は、制御回路 1 1 1 が、ロボット制御システム 1 1 0 の通信インターフェース 1 1 3 に出力する移動コマンドを生成し、通信インターフェース 1 1 3 に移動コマンドを出力することを含むことができる。通信インターフェース 1 1 3 は、ロボットに移動コマンドを通信することができ、移動コマンドにより、ロボットアームは、カメラ視野における少なくとも 1 つの位置までキャリブレーションパターンを移動させることができる。一実施形態では、ステップ 901 は、図 4 のステップ 401 ～ 405 と同様に実施することができる。

40

【0078】

ステップ 902 において、制御回路 1 1 1 は、通信インターフェース 1 1 3 を介してカ

50

メラからキャリブレーション画像を取得するか又は他の方法で受け取り、キャリブレーション画像は、カメラによって取り込まれ、少なくとも1つの位置におけるキャリブレーションパターンの画像である。一実施形態では、ステップ902は、ステップ407と同様に実施することができる。一実施形態では、ステップ902は、制御回路111が、カメラコマンドを介して、図6A～図6D又は図8Bにおけるキャリブレーション画像のうちの1つ等、少なくとも1つの位置にあるキャリブレーションパターンに対応するキャリブレーション画像を取り込むように、カメラを制御することを含むことができる。

【0079】

ステップ903において、制御回路111は、複数のパターン要素がキャリブレーション画像に現れるそれぞれの位置を示す複数の画像パターン要素位置（取り込まれたパターン要素位置とも呼ぶ）を求めることができる。例えば、パターン要素の各々は円形ドットである場合があり、特定の円形ドットの取り込まれた要素位置は、円形ドットがキャリブレーション画像に現れるピクセル座標 $[u \ v]^T$ とすることができ、より具体的には、円形ドットの中心の推定されたピクセル座標とすることができる。

【0080】

ステップ905において、制御回路111は、複数の画像パターン要素位置（例えば、一組の $[u \ v]^T$ 座標）に基づき、かつ定義されたパターン要素位置（例えば、一組の

【数83】

$[X' \ Y' \ Z']_{Pattern}^T$

座標）に基づき、カメラの第1の固有カメラパラメーターの第1の推定値を求めることができる。場合により、カメラは、レンズ及び画像センサーを備え、第1の固有カメラパラメーターは、画像センサーへの画像射影を記述する射影行列とすることができる。例えば、第1の固有カメラパラメーターは射影行列Kとすることができる。場合により、第1の固有カメラパラメーターは、パラメーター f_x 、 f_y 、 C_x 及び C_y のうちの1つ等、射影行列Kの成分とすることができる。

【0081】

上述したように、射影行列Kは、様々なパターン要素の

【数84】

$[X' \ Y' \ Z']_{Pattern}^T$

のそれぞれの既知の座標に基づき、かつ、様々なパターン要素がキャリブレーションパターンのキャリブレーション画像に現れるそれぞれの既知の $[u \ v]^T$ 座標に基づき、推定することができる。一実施形態では、 $[u \ v]^T$ は、

【数85】

$K * T_{Camera}^{Pattern} [X' \ Y' \ Z']_{Pattern}^T$

に関連することができる。この実施形態では、

【数86】

$T_{Camera}^{Pattern}$

は、図3B及び図3Cに示すもの等の、パターン座標系とカメラ座標系との関係を記述する線形変換とすることができる。例えば、それは、以下の関係を反映することができる。

【数87】

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \\ 1 \end{bmatrix}_{Camera} = T_{camera}^{pattern} \begin{bmatrix} X' \\ Y' \\ Z' \\ 1 \end{bmatrix}_{Pattern}$$

【0082】

場合により、

【数 8 8】

$$T_{camera}^{pattern}$$

は、回転行列 R 及び並進ベクトル t を含むことができる。例えば、それは、以下の形式の 4×4 行列として書くことができる。

【数 8 9】

$$T_{camera}^{pattern} = \begin{bmatrix} R_{camera}^{pattern} & t_{camera}^{pattern} \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$$

【0 0 8 3】

一実施形態では、ステップ 9 0 5 は、複数のピクセル座標 $[u \ v]^T$ 及びそれらの対応する座標

【数 9 0】

$$[X' \ Y' \ Z']_{Pattern}^T$$

に基づいて、 K 及び

【数 9 1】

$$T_{Camera}^{Pattern}$$

を解くことを含むことができる。一実施形態では、パースペクティブ- n ポイント (perspective- n -point) アルゴリズムを用いて、

【数 9 2】

$$T_{Camera}^{Pattern}$$

の推定値を求めることができる。一実施形態では、このステップは、レンズ歪みも考慮することができる、歪みパラメータの推定値を求めることができる。しかしながら、この推定された値は、ステップ 9 0 5 が実施された後に破棄することができる、又はより一般的には、方法 9 0 0 の他のステップでは使用されない。一実施形態では、ステップ 9 0 5 は、開示内容が引用することにより全体として本明細書の一部をなす、Zhengyou Zhang による「A Flexible New Technique for Camera Calibration」(Technical Report MSR-TR-98-71) において考察されている、カメラキャリブレーションアルゴリズム (Zhang のアルゴリズムとも呼ぶ) に基づいて実施することができる。より具体的には、Zhang のアルゴリズムは、 $[u \ v]^T$ 及び

【数 9 3】

$$[X' \ Y' \ Z']_{Pattern}^T$$

座標を使用して、射影行列 K の推定値、

【数 9 4】

$$T_{Camera}^{Pattern}$$

行列の推定値、及び 1 つの歪みパラメータ又は一組の歪みパラメータの推定値を求めることができる。この例では、射影行列 K の推定値は、より詳細に後述するステップ 9 0 7 に対して使用することができる、

【数 9 5】

$$T_{Camera}^{Pattern}$$

の推定された値及び／又は歪みパラメータ (複数の場合もある) の推定値は破棄される場合があり、又は、代替的に、上記推定値のうちの 1 つ以上は、より詳細に後述するように、ステップ 9 0 7 において、パラメータ値の初期推量として使用することもできる。

【0 0 8 4】

ステップ 9 0 7 において、制御回路は、第 1 の固有カメラパラメータの第 1 の推定値

に基づき、かつ、複数の画像パターン要素位置（取り込まれたパターン要素位置とも呼ぶ）に基づき、カメラの第2の固有カメラパラメーター（複数の場合もある）の第1の推定値を求めることができる。場合により、第2の固有カメラパラメーターは、レンズによってもたらされる歪みを記述する歪みパラメーターとすることができる。例えば、上述したように、第2の固有カメラパラメーターは、非線形歪み関数 d_x 及び d_y に対して使用される歪みパラメーターとすることができる。

【0085】

一実施形態では、ステップ907において、制御回路は、（a）第2の固有カメラパラメーター（複数の場合もある）の初期推定値を求めることと、（b）第2の固有カメラパラメーター（複数の場合もある）の初期推定値、射影行列の第1の推定値、及びキャリブレーション画像に基づき、レンズによってもたらされる歪みを補償するキャリブレーション画像の変更されたバージョンを生成することと、（c）キャリブレーション画像の変更されたバージョンにおける湾曲の量を求めることと、（d）キャリブレーション画像の変更されたバージョンにおける湾曲の量に基づき第2の固有カメラパラメーターの初期推定値を調整して、湾曲の量を低減させる第2の固有カメラパラメーターの調整された推定値を生成することとによって、第2の固有カメラパラメーター（複数の場合もある）（例えば、歪みパラメーター（複数の場合もある））の第1の推定値を求めることができる。一実施形態では、第2の固有カメラパラメーターに対する初期推定値は、ゼロ値又は一組のゼロ値を有することができる（例えば、上記歪み関数における k_1 、 k_2 、 k_3 、 p_1 及び／又は p_2 はゼロに等しい）。一実施形態では、第2の固有カメラパラメーターに対する初期推定値は、ステップ905の結果から得ることができる。例えば、ステップ905がZhangのアルゴリズムを使用する場合、このアルゴリズムは、第2の固有カメラパラメーターに対する推定値を出力することができ、この出力された推定値は、第2の固有カメラパラメーターの初期推定値としてステップ907に入力することができる。

【0086】

一実施形態では、キャリブレーション画像の変更されたバージョンは、キャリブレーション画像におけるレンズ歪みを補償しようと試みるバージョンとすることができる。例えば、変更されたバージョンは、キャリブレーション画像に逆歪み関数

【数96】

$$d_x^{-1}$$

及び

【数97】

$$d_y^{-1}$$

を適用することにより生成することができる。1つの例では、カメラによって取り込まれるキャリブレーション画像は、パターン要素がキャリブレーション画像に現れる位置を表すピクセル座標 $[u, v]^T$ によって表すことができ、キャリブレーション画像の変更されたバージョンは、同じパターン要素が、当該変更されたバージョンにおいて現れる位置を表すピクセル座標

【数98】

$$[\tilde{u} \ \tilde{v}]^T$$

によって表すことができる。この例では、ピクセル座標

【数99】

$$[\tilde{u} \ \tilde{v}]^T$$

は、射影行列 K 及び逆歪み関数の推定値によって計算することができる。より具体的には、上述したように、射影行列の推定値を用いて、逆射影行列を求めることができ、それを

用いて以下を求めることができる。

【数 1 0 0】

$$\begin{bmatrix} \hat{X} \\ \hat{Y} \\ 1 \end{bmatrix} = K^{-1} \begin{bmatrix} u \\ v \\ 1 \end{bmatrix}$$

【 0 0 8 7】

さらに上述したように、上記結果を逆歪みに適用して、以下を求めることができる。

【数 1 0 1】

$$\tilde{X} = d_x^{-1}(\hat{X}, \hat{Y})$$

10

$$\tilde{Y} = d_y^{-1}(\hat{X}, \hat{Y})$$

【 0 0 8 8】

上記例では、パターン要素に対する

【数 1 0 2】

$$\hat{X}$$

及び

【数 1 0 3】

20

$$\hat{Y}$$

は、レンズ歪みが適用される場合にパターン要素がカメラの視野において現れる場所に関連し、

【数 1 0 4】

$$\tilde{X}$$

及び

【数 1 0 5】

30

$$\tilde{Y}$$

は、レンズ歪みに対する補償がある場合にパターン要素がカメラの視野において現れる場所に関連する。射影行列を

【数 1 0 6】

$$\tilde{X}$$

及び

【数 1 0 7】

$$\tilde{Y}$$

40

に適用して、関係

【数 1 0 8】

$$\begin{bmatrix} \tilde{u} \\ \tilde{v} \\ 1 \end{bmatrix} = K \begin{bmatrix} \tilde{X} \\ \tilde{Y} \\ 1 \end{bmatrix}$$

に基づき、ピクセル座標

【数 1 0 9】

$$[\tilde{u} \ \tilde{v}]^T$$

を求めることができる。

50

【0089】

上記例では、逆歪み関数は、1つ以上の歪みパラメーターを含むことができる。1つ以上の歪みパラメーターに対する推定値は、レンズ歪みを最適に補償するように最適化することができる。より具体的には、推定値は、1つ以上の歪みパラメーターに対してそれぞれ1つ以上の推定された値を含むことができ、キャリブレーション画像の変更されたバージョンにおいて歪みの量を最小限にするか又は他の方法で低減させるように最適化することができる。例えば、制御回路111は、いずれの推定値がキャリブレーション画像の変更されたバージョンにおいて湾曲の量を最小限にするかを評価するために、キャリブレーション画像の異なる変更されたバージョンを生成するように、1つ以上の歪みパラメーターに対して異なる推定を試行することができ、湾曲の量は、湾曲スコアとして求めることができる。歪みパラメーターに対する最適な推定値は、歪みパラメーターの第1の推定値として扱うことができる。上述したように、キャリブレーションパターンは、場合により、直線格子線に沿って配置されるパターン要素を含むことができる。レンズ歪みにより、パターン要素は、キャリブレーション画像において、湾曲経路に沿って配置されているかのように見える可能性がある。歪みのないキャリブレーション画像の変更されたバージョンは、いかなる湾曲も示さない可能性があり、それにより、パターン要素は、キャリブレーション画像の変更されたバージョンにおいて、直線格子線に沿って配置されているかのように見える。

10

【0090】

一実施形態では、直線当てはめ (line fitting) 技法を用いて、キャリブレーション画像の変更されたバージョンにおける湾曲の量を求めることができる。例えば、キャリブレーションパターンにおける複数のパターン要素は、複数のドット (例えば、円形ドット) である場合がある。こうした場合、制御回路は、ステップ907において、キャリブレーション画像の変更されたバージョンにおいて複数のドットを通して (例えば、ドットのそれぞれの中心を通して) 複数の直線を当てはめ、複数の直線のうちの各直線と、直線が当てはめられる複数のドットのうちのそれぞれのドット (例えば、ドットのそれぞれの中心) との間の距離に基づき、湾曲の量を求めることにより、湾曲の量を求めることができる。キャリブレーション画像の変更されたバージョンが歪んでいなかった場合、各直線は、その直線が当てはめられるドットとゼロの距離、又はより具体的には、ドットのそれぞれの中心とゼロの距離を有する。例えば、直線は、ドットのそれぞれの中心を通る。しかしながら、図10Aは、或る程度のレンズ歪みを示すキャリブレーション画像を示す。その結果、直線のうちの1つ以上は、その直線が当てはめられるドットの全てのそれぞれの中心は通らない。図10Bは、図10Aのドットの一部に対する直線当てはめを示す。この図では、4つのドットを通して当てはめられる直線は、4つのドットのうち3つのドットのそれぞれの中心からずれている。湾曲の量は、当てはめられた直線から出ているそれぞれの矢印によって示すように、図10Bにおける各ドットの中心と当てはめられた直線との間のそれぞれの距離に基づいて計算することができる。一実施形態では、キャリブレーション画像の変更されたバージョンに対する湾曲の量は、例えば、直線当てはめに関与する個々の直線に対するそれぞれの湾曲スコアの合計とすることができる、総湾曲スコアによって表すことができる。一実施形態では、ステップ907は、キャリブレーション画像の変更されたバージョンに対する総湾曲スコアを最小限にするように、複数の歪みパラメーターのそれぞれの推定された値を最適化することを含むことができ、変更されたバージョンは、推定された値に基づいて生成される。

20

30

40

【0091】

図9Bに示すように、ステップ909において、制御回路111は、第2の固有カメラパラメーターの第1の推定値に基づき、第1の固有カメラパラメーターの第2の推定値と第2の固有カメラパラメーターの第2の推定値とを求めることができる。一実施形態では、ステップ909における判断はまた、複数の画像パターン要素位置と定義されたパターン要素位置とにも基づく。ステップ909において、第2の固有カメラパラメーターの第1の推定値を用いて、第1の固有カメラパラメーターの第1の推定値を精密化することが

50

でき、精密化された推定値は、第1の固有カメラパラメーターの第2の推定値である。上述したように、ステップ907において第2の固有カメラパラメーターは別個の段階で推定されるため、第2の固有カメラパラメーターのこの推定値は、第1の固有カメラパラメーターの第1の推定値及び第2の固有カメラパラメーターの第1の推定値が同じ段階で同時に求められる状況と比較して、より正確である可能性がある。一実施形態では、その後、第2の固有カメラパラメーターのこのより正確な推定値を用いて、第1の固有カメラパラメーターのより適切な更新された推定値を生成することができ、更新された推定値は、第1の固有カメラパラメーターの第2の推定値である。

【0092】

一実施形態では、ステップ909において、Zhangのアルゴリズムを使用することができる。より具体的には、Zhangのアルゴリズムは、入力として、第2の固有カメラパラメーターに対する初期推量値を受け入れることができる。初期推量値は、Zhangのアルゴリズムに対する任意選択的な入力とすることができる。場合により、この任意選択的な入力は、ステップ905において使用されていない可能性がある。しかしながら、この任意選択的な入力はステップ909において使用することができ、そこでは、第2の固有カメラパラメーターの第1の推定値は、Zhangのアルゴリズムに対する初期推量値として適用され、Zhangのアルゴリズムは、複数の画像パターン要素位置と定義されたパターン要素位置とを更に使用して、第1の固有カメラパラメーターの第2の推定値を生成することができる。一実施形態では、Zhangのアルゴリズムは、第2の固有カメラパラメーターの第2の推定値を更に生成することができ、カメラ座標系とパターン座標との関係を記述する変換関数（例えば、

【数110】

$$T_{CAMERA}^{PATTERN}$$

）の推定値を更に出力することができる。

【0093】

ステップ901～909は、カメラキャリブレーションプロセスの固有キャリブレーションフェーズの一部とすることができる。一実施形態では、固有キャリブレーションフェーズは、制御回路が、第1の固有カメラパラメーターの第2の推定値と第2の固有カメラパラメーターの第2の推定値とを用いて、パターン要素のシミュレートされた位置を求め、それらの推定値を調整して、パターン要素のシミュレートされた位置と実際の位置との差を最小限にする第3の推定値を生成する段階を更に含むことができる。

【0094】

より具体的には、制御回路は、（a）第1の変換関数の推定値、第2の固有カメラパラメーターの第2の推定値、及び第1の固有カメラパラメーターの第2の推定値に基づいて、キャリブレーションパターンのシミュレートされた画像であるシミュレートキャリブレーション画像を求めることと、（b）シミュレートキャリブレーション画像とカメラによって取り込まれたキャリブレーション画像との差を求めることと、（c）差に基づき、第2の固有カメラパラメーターの第2の推定値と第1の固有カメラパラメーターの第2の推定値とを調整して、差を低減させる、第2の固有カメラパラメーターの調整された推定値及び第1の固有カメラパラメーターの調整された推定値を生成することであって、第2の固有カメラパラメーターの調整された推定値は、第2の固有カメラパラメーターの第3の推定値であり、第1の固有カメラパラメーターの調整された推定値は、第1の固有カメラパラメーターの第3の推定値であることと、によって、第2の固有カメラパラメーターの第3の推定値と第1の固有カメラパラメーターの第3の推定値とを求めることができる。

【0095】

一実施形態では、シミュレートキャリブレーション画像は、様々なパターン要素のシミュレートされたピクセル座標 $[u_{simulated} \ v_{simulated}]^T$ を含むことができる。パターン要素に対するシミュレートされたピクセル座標は、固有カメラパラメーターの、例えば

10

20

30

40

50

【数 1 1 1】

 $T_{CAMERA}^{PATTERN}$

のそれぞれの推定値に基づいてパターンが現れる場所を予測する、予測されたピクセル座標とすることができる。例えば、シミュレートされたピクセル座標は、以下の関係に基づくことができる。

【数 1 1 2】

$$\begin{bmatrix} X_{simulated} \\ Y_{simulated} \\ Z_{simulated} \\ 1 \end{bmatrix}_{Camera} = T_{CAMERA}^{PATTERN} \begin{bmatrix} X' \\ Y' \\ Z' \\ 1 \end{bmatrix}_{Pattern} \quad 10$$

$$\hat{x} = d_x \left(\frac{X}{Z}, \frac{Y}{Z} \right), \hat{y} = d_y \left(\frac{X}{Z}, \frac{Y}{Z} \right)$$

$$\begin{bmatrix} u_{simulated} \\ v_{simulated} \\ 1 \end{bmatrix} = K \begin{bmatrix} \hat{x} \\ \hat{y} \\ 1 \end{bmatrix} \quad 20$$

【0 0 9 6】

上記例では、Kは、第1の固有カメラパラメーターの第2の推定値とすることができ、第1の固有カメラパラメーターの第3の推定値を見つけるように調整することができる。歪み関数 d_x 及び d_y は、第2の固有カメラパラメーター（複数の場合もある）の第2の推定値に基づくことができ、それは、第2の固有カメラパラメーターの第3の推定値を見つけるように調整することができる。さらに、

【数 1 1 3】

 $T_{CAMERA}^{PATTERN}$

30

は、ステップ909から得られる推定値とすることができ、 $[X' \ Y' \ Z']_{pattern}$ は、パターン座標系におけるパターン要素の既知の座標である。

【0 0 9 7】

上記例では、制御回路111は、それぞれのシミュレートされたピクセル座標と実際のピクセル座標との間の距離を計算することができ、シミュレートされたピクセル座標は、 $[X' \ Y' \ Z']_{pattern}$ におけるパターン要素がシミュレートキャリブレーション画像に現れる場所を表し、実際のピクセル座標は、パターン要素が、カメラによって取り込まれたキャリブレーション画像に実際に現れる場所を表す。制御回路111は、第1の固有カメラパラメーター（射影行列K）の第2の推定値と、第2の固有カメラパラメーター（複数の場合もある）（例えば、歪みパラメーター（複数の場合もある））の推定値と、

40

【数 1 1 4】

 $T_{CAMERA}^{PATTERN}$

の推定値とを、距離が最小化する（例えば、ゼロに近づく）まで調整することにより、最適化を実施することができる。これらのパラメーターに対する調整された推定値は、それらの第3の推定値になることができる。一実施形態では、第1の固有カメラパラメーターの第3の推定値は、第1の固有カメラパラメーターの最終推定値とすることができ、第2の固有カメラパラメーターの第3の推定値は、第2の固有カメラパラメーターの最終推定値とすることができ、それにより、固有キャリブレーションフェーズの出力は、第1の固

50

有カメラパラメーター及び第2の固有カメラパラメーターの第3の推定値とすることができる。

【0098】

上述したように、カメラキャリブレーションは、固有キャリブレーションフェーズに加えてステレオキャリブレーションフェーズを含むことができる。例えば、システム100A等、2つ以上のカメラを含むシステムでは、ロボット制御システム110は、第1のカメラ及び第2のカメラと通信するように構成される。第1のカメラは、第1のカメラの位置及び向きに関して定義される第1のカメラ座標系を有することができ、第2のカメラは、第2のカメラの位置及び向きに関して定義される第2のカメラ座標系を有することができる。この例では、ロボット制御システム110の制御回路111は、第1のカメラ座標系と第2のカメラ座標系との関係を記述する関数（例えば、行列）を求めることにより、ステレオキャリブレーションフェーズを実施するように構成することができる。

10

【0099】

例えば、ロボット制御システム110は、複数のカメラと通信する場合、複数のカメラの各々に対する固有カメラパラメーターの値を推定し、複数のカメラの互いに対する位置及び／又は互いに対するそれらの向きを推定するように構成することができる。一実施形態では、2つのカメラ（例えば、図1Aの170及び180）の間の相対位置及び向きは、2つのカメラの間の並進ベクトル及び回転行列として表すことができる。

【0100】

上述したように、カメラキャリブレーションは、ハンドーアイキャリブレーションフェーズを含むことができる。例えば、ステップ911において、制御回路111は、第1の固有カメラパラメーターの第2の推定値と第2の固有カメラパラメーターの第2の推定値とに基づき、カメラ座標系とワールド座標系との関係を記述する変換関数（例えば、

20

【数115】

T_{World}^{Camera}

）の推定値を求めることができる。上述したように、カメラ座標系は、カメラの位置及び向きに関して定義される座標系とすることができ、ワールド座標系は、ロボットのベースに対して固定である位置に関して定義される座標系である。ステップ911は、固有カメラパラメーターの第2の推定値に直接基づくことができ、又は、それらの固有カメラパラメーターの第2の推定値に間接的に基づくことができる。例えば、ステップ911は、第1の固有カメラパラメーターの第3の推定値と第2の固有カメラパラメーターの第3の推定値とに直接基づくことができ、それらは、さらに、第1の固有カメラパラメーターの第2の推定値と第2の固有カメラパラメーターの第2の推定値とに基づく。こうした場合、ステップ911は、固有カメラパラメーターの第2の推定値に間接的に基づく。

30

【0101】

一実施形態では、

【数116】

$T_{CAMERA}^{PATTERN}$

40

は、第1の変換関数の一例とすることができ、

【数117】

T_{WORLD}^{CAMERA}

は、第2の変換関数の一例とすることができる。場合により、第2の変換関数は、第1の変換関数に基づいて求めることができる。

【0102】

より具体的な例では、ハンドーアイキャリブレーションの目的は、（第3の変換関数の一例とすることができる）

【数 1 1 8】

$T_{CAMERA}^{PATTERN}$

及び

【数 1 1 9】

T_{WORLD}^{LINK}

に基づき、（第 4 の変換関数の一例とすることができる）

【数 1 2 0】

T_{WORLD}^{CAMERA}

10

及び

【数 1 2 1】

$T_{LINK}^{PATTERN}$

を求めることとすることができる。

【0 1 0 3】

一実施形態では、ハンドーアイキャリブレーションは、以下の関係に基づくことができる。

【数 1 2 2】

20

$T_{WORLD}^{LINK} T_{LINK}^{PATTERN} = T_{WORLD}^{CAMERA} T_{CAMERA}^{PATTERN}$

【0 1 0 4】

上記例では、

【数 1 2 3】

T_{WORLD}^{LINK}

及び

【数 1 2 4】

$T_{CAMERA}^{PATTERN}$

30

は、ハンドーアイキャリブレーションフェーズの開始時に既知であるか又は求めることができる。例えば、

【数 1 2 5】

T_{WORLD}^{LINK}

は、ロボット制御システム 1 1 0 がロボット（例えば、図 1 A の 1 5 0）に通信した移動コマンドに基づいて求めることができる。1 つの例では、移動コマンドは、ロボットのロボットアームを形成するリンクの回転をもたらすモーターコマンドとすることができる、

【数 1 2 6】

40

T_{WORLD}^{LINK}

は、モーターコマンドによってもたらされる回転から求めることができる。一例では、

【数 1 2 7】

$T_{CAMERA}^{PATTERN}$

は、固有キャリブレーションフェーズから推定される射影行列 K に基づいて求めることができる。例えば、

【数 1 2 8】

$T_{CAMERA}^{PATTERN}$

は、以下の関係に基づく。

【数 1 2 9】

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \\ 1 \end{bmatrix}_{Camera} = T_{CAMERA}^{PATTERN} \begin{bmatrix} X' \\ Y' \\ Z' \\ 1 \end{bmatrix}_{Pattern}$$

【0 1 0 5】

上記例では、

【数 1 3 0】

$[X Y Z]_{Camera}^T$

は、パターン要素のカメラの視野における座標とすることができ、パターン要素が現れるキャリブレーション画像から、かつ、射影行列の推定値及び歪みパラメーターの推定値から推定することができる。場合により、

【数 1 3 1】

$T_{CAMERA}^{PATTERN}$

は、パースペクティブ-nポイント (perspective-n-point) アルゴリズムを使用して推定することができ、パースペクティブ-nポイントアルゴリズムは、射影行列の推定値とカメラの歪みパラメーター（複数の場合もある）の推定値とを用いて、

【数 1 3 2】

$T_{CAMERA}^{PATTERN}$

を求めることができる。射影行列及び歪みパラメーター（複数の場合もある）のこうした推定値は、固有キャリブレーションフェーズからのものとすることができ、又は、カメラの製造業者からの定義された値とすることができ。別の例では、

【数 1 3 3】

$T_{CAMERA}^{PATTERN}$

自体が、固有キャリブレーションフェーズの副産物とすることができ。例えば、固有キャリブレーションフェーズがZhangのアルゴリズムを使用する場合、アルゴリズムは、

【数 1 3 4】

$T_{CAMERA}^{PATTERN}$

の推定値を出力することができ、この推定値は、ハンドーアイキャリブレーションフェーズのために保存することができる。

【0 1 0 6】

一実施形態では、方程式

【数 1 3 5】

$$T_{WORLD}^{LINK} T_{LINK}^{PATTERN} = T_{WORLD}^{CAMERA} T_{CAMERA}^{PATTERN}$$

は、未知の行列

【数 1 3 6】

T_{WORLD}^{CAMERA}

及び

10

20

30

40

【数 1 3 7】

 $T_{LINK}^{PATTERN}$

に対して非線形であり非凸である。非凸形式は、行列の値に対する異なる推量を通して反復することの有効性を制限する可能性があり、その理由は、反復により、大域的に最適ではなく局所的にのみ最適である解が導き出される可能性があるためである。したがって、ハンドアイキャリブレーションフェーズの実施態様は、上記方程式を凸形式に再公式化することを含むことができる。一実施形態では、再公式化は、ベクトル化行列のクロネッカー積として上記方程式を書き換えることを含むことができる。

【0 1 0 7】

10

より具体的には、上記方程式は、以下のように書き換えることができる。

【数 1 3 8】

$$\begin{bmatrix} R_{WORLD}^{LINK} & t_{WORLD}^{LINK} \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} R_{LINK}^{PATTERN} & t_{LINK}^{PATTERN} \\ 0 & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_{WORLD}^{CAMERA} & t_{WORLD}^{CAMERA} \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} R_{CAMERA}^{PATTERN} & t_{CAMERA}^{PATTERN} \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$$

【0 1 0 8】

この方程式は、さらに、以下のように2つの方程式として書き換えることができる。

【数 1 3 9】

$$R_A R_X - R_Z R_B = 0$$

20

$$R_Z t_B - R_A t_X + t_Z = t_A$$

【0 1 0 9】

上記方程式では、様々な回転行列及び並進ベクトルに対する命名は、以下のように書かれる。

【数 1 4 0】

$$R_A = R_{WORLD}^{LINK}, R_X = R_{LINK}^{PATTERN}, R_Z = R_{WORLD}^{CAMERA}, R_B = R_{CAMERA}^{PATTERN}$$

$$t_A = t_{WORLD}^{LINK}, t_X = t_{LINK}^{PATTERN}, t_Z = t_{WORLD}^{CAMERA}, t_B = t_{CAMERA}^{PATTERN}$$

30

【0 1 1 0】

上記方程式は、上記行列及びクロネッカー積のベクトル化バージョンを使用して以下の方程式として書き換えることができる。

【数 1 4 1】

$$\begin{bmatrix} R_A \otimes I_3 & R_B^T \otimes I_3 & 0 & 0 \\ 0 & I_3 R_B^T \otimes t_B^T & -R_A & I_3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \text{vec}(R_X) \\ \text{vec}(R_Z^T) \\ t_X \\ t_Z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ t_A \end{bmatrix}$$

【0 1 1 1】

40

上記例では、 I_3 は 3×3 単位行列である。上記方程式は、線形かつ凸であり、それにより、 R_X 、 t_X 、 R_Z 、 t_Z の最適な値、すなわち、

【数 1 4 2】

$$R_{LINK}^{PATTERN}, t_{LINK}^{PATTERN}, R_{WORLD}^{CAMERA}, t_{WORLD}^{CAMERA}$$

を解くのを容易にすることができる。より具体的には、上記方程式において、項

【数 1 4 3】

$$\begin{bmatrix} R_A \otimes I_3 & R_B^T \otimes I_3 & 0 & 0 \\ 0 & I_3 R_B^T \otimes t_B^T & -R_A & I_3 \end{bmatrix}$$

50

及び

【数 1 4 4】

$$\begin{bmatrix} 0 \\ t_A \end{bmatrix}$$

は、

【数 1 4 5】

$$T_{WORLD}^{LINK}$$

及び

【数 1 4 6】

$$T_{CAMERA}^{PATTERN}$$

10

に属する成分を含むため、既知とすることができる。したがって、上記方程式は、未知の項である

【数 1 4 7】

$$\begin{bmatrix} \text{vec}(R_X) \\ \text{vec}(R_Z^T) \\ t_X \\ t_Z \end{bmatrix}$$

を解くことができる。上述したように、方程式の線形及び凸の性質により、この未知の項を解くことをより容易にすることができ、未知の項の解は、

20

【数 1 4 8】

$$T_{WORLD}^{LINK}$$

及び

【数 1 4 9】

$$T_{CAMERA}^{PATTERN}$$

の成分である R_X 、 t_X 、 R_Z 、 t_Z を再構築するために使用することができる。

【0 1 1 2】

30

一実施形態では、上記方程式に対する解により、完全回転行列ではない R_X 及び R_Z が導き出される可能性があり、その理由は、それらが各々、互いに直交ではない列ベクトルを含む可能性があるためである。この実施形態では、制御回路 1 1 1 は、 R_X から、互いに直交する列ベクトルを有する行列

【数 1 5 0】

$$R_X^*$$

を導出することができる。同様に、制御回路 1 1 1 は、 R_Z から、互いに直交する列ベクトルを有する回転行列

【数 1 5 1】

40

$$R_Z^*$$

を導出することができる。一実施形態では、制御回路 1 1 1 は、直交プロクラスティクス問題を解くことに基づき、この演算を実施することができ、それは、非直交行列 R_X （フロベニウスノルムに関する）に最も近い直交行列

【数 1 5 2】

$$R_X^*$$

を見つけることと、非直交行列 R_Z に最も近い直交行列

【数 1 5 3】

$$R_Z^*$$

を見つけることとを含む。場合により、これは、特異値分解を介して行うことができ、それは、

【数 1 5 4】

$$C_X \Sigma D_X^T$$

が R_X に等しいような行列 C_X 及び D_X を見つけることと、 Σ が対角行列である場合、

【数 1 5 5】

$$C_Z \Sigma D_Z^T$$

が R_Z に等しいような行列 C_Z 及び D_Z を見つけることとを含むことができる。この実施形態では、

【数 1 5 6】

$$R_X^*$$

は、

【数 1 5 7】

$$C_X D_X^T$$

として求めることができ、

【数 1 5 8】

$$R_Z^*$$

は、

【数 1 5 9】

$$C_Z D_Z^T$$

として求めることができる。

【0 1 1 3】

一実施形態では、制御回路 1 1 1 は、直交行列

【数 1 6 0】

$$R_X^*$$

及び

【数 1 6 1】

$$R_Z^*$$

を使用して、並進ベクトル t_X 及び t_Z を更に更新することができる。更新された並進ベクトルは、

【数 1 6 2】

$$t_X^*$$

及び

【数 1 6 3】

$$t_Z^*$$

と呼ぶことができる。幾つかの実施態様では、更新は、上記方程式 $R_Z t_B - R_A t_X + t_Z = t_A$ を使用するが、 R_Z の代わりに

10

20

30

40

50

【数 1 6 4】

R_Z^*

を使用し、 t_x の代わりに

【数 1 6 5】

t_X^*

を使用し、 t_z の代わりに

【数 1 6 6】

t_Z^*

10

を使用することにより、行うことができる。結果として得られる方程式は、

【数 1 6 7】

$$R_Z^* t_B - R_A t_X^* + t_Z^* = t_A$$

として表すことができ、それは、

【数 1 6 8】

$$[-R_A \quad I_3] \begin{bmatrix} t_X^* \\ t_Z^* \end{bmatrix} = t_A - R_Z^* t_B$$

と書き換えることができる。上記方程式は、

【数 1 6 9】

20

t_X^*

及び

【数 1 7 0】

t_Z^*

に対して解くことができる。結果として得られる回転行列及び並進ベクトルは、

【数 1 7 1】

$T_{LINK}^{PATTERN}$

30

及び

【数 1 7 2】

T_{WORLD}^{CAMERA}

の推定値を形成することができ、それらは、

【数 1 7 3】

$$T_{LINK}^{PATTERN} = T_X = \begin{bmatrix} R_X^* & t_X^* \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$$

40

$$T_{WORLD}^{CAMERA} = T_Z = \begin{bmatrix} R_Z^* & t_Z^* \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$$

として表すことができる。

【0 1 1 4】

一実施形態では、ハンドーアイキャリブレーションフェーズは、上記パラメーターを使用してキャリブレーションパターンのシミュレートされた画像であるシミュレートキャリブレーション画像を求めることと、シミュレートキャリブレーション画像と、キャリブレーションパターンの実際の画像である実際のキャリブレーション画像との差を最小限にするように、上記パラメーターの値を調整することを含むことができる。より具体的には

50

、制御回路 111 は、第 4 の変換関数（例えば、
【数 174】

$$T_{LINK}^{PATTERN}$$

）の推定値、第 3 の変換関数（例えば、
【数 175】

$$T_{WORLD}^{LINK}$$

）の推定値、第 2 の変換関数（例えば、
【数 176】

$$T_{WORLD}^{CAMERA}$$

）の推定値に基づき、かつ、第 1 の固有カメラパラメーター（例えば、射影行列 K）の第 2 の推定値に（直接又は間接的に）基づき、キャリブレーションパターンのシミュレートキャリブレーション画像を求めることができる。シミュレートキャリブレーション画像は、例えば、パターン要素がシミュレートキャリブレーション画像に現れる場所のピクセル座標

【数 177】

$$[\tilde{u}_{sim} \ \tilde{v}_{sim}]^T$$

、パターン要素に対するシミュレートされた座標は、パターン要素が上記変換関数のそれぞれの推定値に基づくキャリブレーション画像に現れる場所を予測する、予測された座標とすることができる。例えば、シミュレートされたピクセル座標は、以下の関係に基づいて計算することができる。

【数 178】

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \\ 1 \end{bmatrix}_{Camera} = T_{CAMERA}^{PATTERN} \begin{bmatrix} X' \\ Y' \\ Z' \\ 1 \end{bmatrix}_{Pattern} = (T_{WORLD}^{CAMERA})^{-1} T_{WORLD}^{LINK} T_{LINK}^{PATTERN} \begin{bmatrix} X' \\ Y' \\ Z' \\ 1 \end{bmatrix}_{Pattern}$$

$$\begin{bmatrix} \tilde{u}_{sim} \\ \tilde{v}_{sim} \\ 1 \end{bmatrix} = K \begin{bmatrix} X/Z \\ Y/Z \\ 1 \end{bmatrix}_{CAMERA}$$

【0115】

一実施形態では、シミュレートキャリブレーション画像は、レンズ歪みの影響を考慮する必要はない。別の実施形態では、シミュレートキャリブレーション画像は、X/Z 及び Y/Z に歪み関数を適用することによる等、レンズ歪みの影響を考慮する。

【0116】

一実施形態では、シミュレートキャリブレーション画像は、カメラによって取り込まれた実際のキャリブレーション画像の変更されたバージョンと比較することができる。変更されたバージョンは、カメラのレンズによってもたらされる歪みを補償することができる。より具体的には、実際のキャリブレーション画像は、パターン要素のピクセル座標 $[u, v]^T$ によって表すことができ、レンズ歪みを示す可能性がある。キャリブレーション画像の変更されたバージョンは、パターン要素のピクセル座標

【数 179】

$$[\tilde{u} \ \tilde{v}]^T$$

によって表すことができ、レンズ歪みの影響を補償することができる。上述したように、キャリブレーション画像の変更されたバージョンは、以下の関係に基づいて求めることが

10

20

30

40

50

できる。

【数 1 8 0】

$$\begin{bmatrix} \hat{X} \\ \hat{Y} \\ 1 \end{bmatrix} = K^{-1} \begin{bmatrix} u \\ v \\ 1 \end{bmatrix}$$

$$\hat{X} = d_x^{-1}(\hat{X}, \hat{Y})$$

$$\tilde{Y} = d_y^{-1}(\hat{X}, \hat{Y})$$

10

$$\begin{bmatrix} \tilde{u} \\ \tilde{v} \\ 1 \end{bmatrix} = K \begin{bmatrix} \tilde{X} \\ \tilde{Y} \\ 1 \end{bmatrix}$$

【0 1 1 7】

一実施形態では、制御回路 1 1 1 は、シミュレートキャリブレーション画像におけるパターン要素のシミュレートされたピクセル座標と、カメラによって取り込まれるキャリブレーション画像の変更されたバージョンにおける対応するパターン要素のピクセル座標との（例えば、

20

【数 1 8 1】

$$[\tilde{u}_{sim} \ \tilde{v}_{sim}]^T$$

【数 1 8 2】

$$[\tilde{u} \ \tilde{v}]^T$$

との）差を求めることができる。一実施形態では、差は、

【数 1 8 3】

$$distance = \sqrt{(\tilde{u}_{sim} - \tilde{u})^2 + (\tilde{v}_{sim} - \tilde{v})^2}$$

30

として求められる距離として表すことができる。

【0 1 1 8】

一実施形態では、制御回路 1 1 1 は、少なくとも、第 4 の変換関数（例えば、

【数 1 8 4】

$$T_{LINK}^{PATTERN}$$

）の推定値と、第 2 の変換関数（例えば、

【数 1 8 5】

$$T_{WORLD}^{CAMERA}$$

40

）の推定値とを調整して、シミュレートキャリブレーション画像とキャリブレーション画像の変更されたバージョンとの差を低減させることができる。例えば、制御回路 1 1 1 は、

【数 1 8 6】

$$T_{LINK}^{PATTERN}$$

及び

【数 1 8 7】

T_{WORLD}^{CAMERA}

の成分のそれぞれの値を調整し、調整された行列に基づいて

【数 1 8 8】

$[\tilde{u}_{sim} \ \tilde{v}_{sim}]^T$

を再計算し、再計算された

【数 1 8 9】

$[\tilde{u}_{sim} \ \tilde{v}_{sim}]^T$

10

に基づいて距離を求めることができる。制御回路 1 1 1 は、上記距離を最小限にするように調整を繰り返すことができる。一実施形態では、制御回路 1 1 1 は、シミュレートキャリブレーション画像における誤差を最小限にするように上記行列を調整することができ、誤差は、(a) キャリブレーション画像の変更されたバージョンにおける全てのパターン要素のそれぞれのピクセル座標と、(b) シミュレートキャリブレーション画像における同じ対応するパターン要素のそれぞれのピクセルとの間のそれぞれの距離の和とすることができる。一実施形態では、調整は、ネルダーミード (Nelder-Mead) アルゴリズム、ブロイデンフレッチャーゴールドファブーシャンノ (B F G S : Broyden-Fletcher-Goldfarb-Shanno) アルゴリズム及び最急降下法アルゴリズム等、制約なし非線形最適化問題を解く最適化アルゴリズムに基づくことができる。一実施形態では、上記最適化は、

20

【数 1 9 0】

$T_{CAMERA}^{PATTERN}$

、K 及び／又は 1 つ以上の歪みパラメーターのそれぞれの値に対する調整も含むことができる。一実施形態では、最適化の結果は、ハンドーアイキャリブレーションフェーズに対する最終推定値 (例えば、

【数 1 9 1】

$T_{LINK}^{PATTERN}$

30

及び／又は

【数 1 9 2】

T_{WORLD}^{CAMERA}

の最終推定値) とすることができる。

【0 1 1 9】

図 9 B に戻ると、方法 9 0 0 は、ステップ 9 1 1 の後に実施されるステップ 9 1 3 を含むことができる。ステップ 9 1 3 では、制御回路 1 1 1 は、カメラから後続する画像を受け取り、後続する画像に基づきかつ変換関数の推定値に基づく後続する移動コマンドを (例えば、通信インターフェース 1 1 3 を介して) ロボットに出力することにより、ロボットアームの配置を制御することができる。例えば、後続する画像は、コンベヤベルト上の包装品又はカメラ視野内の別の物体の画像とすることができる。カメラは、自動的に、又は、制御回路 1 1 1 によって生成され通信インターフェースを介してカメラに通信されるカメラコマンドに応じて、後続する画像を取り込むことができる。一実施形態では、制御回路 1 1 1 は、変換関数 (例えば、

40

【数 1 9 3】

T_{WORLD}^{CAMERA}

) の推定値に基づき、後続する移動コマンドを生成することができる。例えば、

【数 1 9 4】

$$T_{WORLD}^{CAMERA}$$

を使用して、撮影された物体（例えば、包装品）と、物体と相互作用するロボットとの関係を、以下の関係に基づいて求めることができる。

【数 1 9 5】

$$T_{WORLD}^{OBJECT} = T_{WORLD}^{CAMERA} T_{CAMERA}^{OBJECT}$$

【0 1 2 0】

上記方程式では、

【数 1 9 6】

$$T_{WORLD}^{CAMERA}$$

は、カメラキャリブレーションから求められ、

【数 1 9 7】

$$T_{CAMERA}^{OBJECT}$$

は、場合により、マシンビジョンアルゴリズムから求めることができる。本明細書で考察するカメラキャリブレーションは、

【数 1 9 8】

$$T_{WORLD}^{CAMERA}$$

のより正確な推定値等、より正確なキャリブレーション情報を生成するため、このキャリブレーション情報は、

【数 1 9 9】

$$T_{WORLD}^{OBJECT}$$

のより正確な推定値をもたらすことができ、それにより、ロボットが、物体とのよりロバストな相互作用を提供するように制御されるのを可能にすることができる。

【0 1 2 1】

図 1 1 A は、カメラキャリブレーションの固有キャリブレーションフェーズの一実施形態を示す別の図を提供する。場合により、図 1 1 A の動作は、例えば、図 1 A のロボット制御システム 1 1 0 の図 1 A の制御回路 1 1 1 によって実施することができる。一実施形態では、固有キャリブレーションフェーズは、段階 0 を含み、そこでは、複数のキャリブレーション画像が受け取られ、当該キャリブレーション画像はキャリブレーションパターンの画像である。キャリブレーションパターンは、ロボットのロボットアームに固定して取り付けことができ、パターンドットであるパターン要素を有することができる。パターンドットの各々は、定義されたパターン要素位置を有することができる、それは、この例では、3 D パターン座標

【数 2 0 0】

$$[X' Y' Z']_{Pattern}^T$$

とすることができる。複数のキャリブレーション画像のうちの各キャリブレーション画像に対して、パターンドットの各々はまた、画像パターン要素位置（取り込まれたパターン要素位置とも呼ぶ）を有することもでき、それは、この例では、2 D ピクセル座標とすることができる。一実施形態では、固有キャリブレーションフェーズの段階 0 は、パターン座標系におけるパターンドットのそれぞれの 3 D パターン座標を求めることと、パターンドットが複数のキャリブレーション画像において現れる 2 D ピクセル座標を求めることとを含む。

【0 1 2 2】

一実施形態では、固有キャリブレーションフェーズの段階 1 は、パターンドットの 3 D パターン座標及び 2 D ピクセル座標を、射影行列 K、変換関数

【数 2 0 1】

$T_{CAMERA}^{PATTERN}$

及び歪み関数の歪みパラメーターに対するそれぞれの値を推定するアルゴリズムに入力することを含む。例えば、段階 1 は、Zhang のアルゴリズムを用いて、射影行列 K の第 1 の推定値を生成することができる。この例では、Zhang のアルゴリズム又は他の何らかのアルゴリズムはまた、同じ段階において、

【数 2 0 2】

$T_{CAMERA}^{PATTERN}$

の推定値及び歪みパラメーターのそれぞれの値もまた求めることができるが、これらの推定値は、次の段階に対して破棄するか又は他の方法で無視することができる。一実施形態では、Zhang のアルゴリズムは、任意選択的な入力として、1 つ以上のそれぞれの歪みパラメーターに対する 1 つ以上の推量値を有することができる。しかしながら、図 1 1 A の例では、この任意選択的な入力は段階 1 では使用されない。

【0 1 2 3】

一実施形態では、固有キャリブレーションフェーズの段階 2 は、射影行列 K の第 1 の推定値を線直線化 (line straightening) アルゴリズムに入力することを含み、線直線化アルゴリズムは、歪みパラメーターの第 1 の推定値、又は、一組の歪みパラメーターのそれぞれの推定値の第 1 の組を生成することができる。一実施形態では、線直線化アルゴリズムは、方法 9 0 0 のステップ 9 0 7 に関してかつ図 1 0 A 及び図 1 0 B に関して上述した操作を含むことができる。

【0 1 2 4】

一実施形態では、固有キャリブレーションフェーズの段階 3 は、歪みパラメーターの第 1 の推定値 (又は、複数の歪みパラメーターのそれぞれの推定値の第 1 の組) を使用して、射影行列 K の第 2 の推定値、歪みパラメーターの第 2 の推定値 (又は、複数の歪みパラメーターのそれぞれの推定値の第 2 の組) 及び

【数 2 0 3】

$T_{CAMERA}^{PATTERN}$

の推定値を生成することを含む。場合により、段階 3 において、Zhang のアルゴリズムが再度使用される。しかしながら、この段階は、上述した任意選択的な入力として歪みパラメーターの第 1 の推定値 (又は、複数の歪みパラメーターのそれぞれの推定値の第 1 の組) を使用することができ、任意選択的な入力は、Zhang のアルゴリズムからのより正確な出力をもたらす推量とすることができる。

【0 1 2 5】

一実施形態では、固有キャリブレーションフェーズの段階 4 は、射影行列の第 3 の推定値と歪みパラメーターの第 3 の推定値 (又は、複数の歪みパラメーターに対するそれぞれの推定値の第 3 の組) とを求めることを含む。図 1 1 A に示すように、段階 4 は、オブティマイザーを用いて実施することができる。上述したように、オブティマイザーによって実施される最適化は、

【数 2 0 4】

$T_{CAMERA}^{PATTERN}$

の推定値、K の第 2 の推定値、及び歪みパラメーターの第 2 の推定値に基づき、キャリブレーションパターンのシミュレートキャリブレーション画像を求めることと、シミュレートキャリブレーション画像とキャリブレーションパターンの実際のキャリブレーション画像との差を最小限にするように第 2 の推定値を調整することとを含むことができる。

【0126】

図11Aの上記実施形態では、段階1における

【数205】

$T_{CAMERA}^{PATTERN}$

の推定値及び／又は歪みパラメーターのそれぞれの値は、次の段階に対して破棄するか又は他の方法で無視することができる。別の実施形態では、段階1に続く任意の段階に対して、上記推定値のうちの1つ以上を使用することができる。例えば、図11Bに示すように、段階1における歪みパラメーター値の推定値は、固有キャリブレーションフェーズの段階2における歪みパラメーター値の初期推量として使用することができる。さらに、図11Bにおいて、

10

【数206】

$T_{CAMERA}^{PATTERN}$

の推定値を用いて、図12のハンドーアイキャリブレーションフェーズの段階2においてハンドーアイキャリブレーションを実施することができる。

【0127】

図12は、カメラキャリブレーションのハンドーアイキャリブレーションフェーズの実施形態例を示す図であり、これもまた、図1Aのロボット制御システム110によって実施することができる。場合により、ハンドーアイキャリブレーションフェーズは、図11Aの固有キャリブレーションフェーズの後に実施される。一実施形態では、ハンドーアイキャリブレーションフェーズの段階1は、

20

【数207】

$T_{CAMERA}^{PATTERN}$

及び

【数208】

T_{WORLD}^{LINK}

の推定値を求めることを含む。場合により、

30

【数209】

T_{WORLD}^{LINK}

は、例えば、ロボットのロボットアームの複数のモーターに対するそれぞれの回転量を示すセンサー値を含むことができる、モーター読取値に基づく。場合により、

【数210】

$T_{CAMERA}^{PATTERN}$

は、画像処理アルゴリズムに基づき、射影行列Kの最終推定値と歪みパラメーターの最終推定値（又は、複数の歪みパラメーターの推定値の最終の組）に基づくことができる。一例では、

40

【数211】

$T_{CAMERA}^{PATTERN}$

は、図11Bの固有キャリブレーションフェーズの段階1からのものとすることができる。

【0128】

一実施形態では、ハンドーアイキャリブレーションフェーズの段階2は、

【数 2 1 2】

T_{WORLD}^{CAMERA}

及び

【数 2 1 3】

$T_{LINK}^{PATTERN}$

を求めることを含む。この判断は、例えば、方程式

【数 2 1 4】

$$T_{WORLD}^{LINK} T_{LINK}^{PATTERN} = T_{WORLD}^{CAMERA} T_{CAMERA}^{PATTERN}$$

10

を解くことを含むことができる。

【0 1 2 9】

一実施形態では、ハンドーアイキャリブレーションフェーズの段階 3 は、少なくとも

【数 2 1 5】

T_{WORLD}^{CAMERA}

及び

【数 2 1 6】

$T_{LINK}^{PATTERN}$

20

の推定値を調整することを含む。この調整は、キャリブレーションパターンのシミュレートキャリブレーション画像とキャリブレーションパターンの実際のキャリブレーション画像との差を最小限にすることに基づいて最適化を実施することができる、オブティマイザーによって実施することができる。シミュレートキャリブレーション画像は、上述したように、

【数 2 1 7】

$$(T_{WORLD}^{CAMERA})^{-1} T_{WORLD}^{LINK} T_{LINK}^{PATTERN} [X' Y' Z']^T T_{PATTERN}^T$$

に基づくことができる。一実施形態では、

30

【数 2 1 8】

T_{WORLD}^{CAMERA}

及び

【数 2 1 9】

$T_{LINK}^{PATTERN}$

の調整された推定値は、ハンドーアイキャリブレーションフェーズのその最終推定値とすることができる。

【0 1 3 0】

40

様々な実施形態の簡単な説明

本開示の実施形態 A 1 は、通信インターフェース及び制御回路を備えるロボット制御システムに関する。通信インターフェースは、ロボット及びカメラ視野を有するカメラと通信するように構成され、ロボットは、ベースと、キャリブレーションパターンが配置されているロボットアームとを有する。制御回路は、a) カメラ視野内に収まる仮想立方体の全ての角位置を求めることと、b) 仮想立方体の上に又は仮想立方体を通して分散される複数の位置を求めることと、c) 通信インターフェースを介してロボットに移動コマンドを出力することにより、仮想立方体の上に又は仮想立方体を通して分散される複数の位置までキャリブレーションパターンを移動させるようにロボットアームを制御することと、d) 通信インターフェースを介してカメラから複数のキャリブレーション画像を受け取る

50

ことであって、複数のキャリブレーション画像は、カメラによって取り込まれ、複数の位置におけるキャリブレーションパターンのそれぞれの画像であることと、e) 複数のキャリブレーション画像に基づき、固有カメラパラメーターのそれぞれの推定値を求めることと、f) 固有カメラパラメーターのそれぞれの推定値に基づき、カメラ座標系とワールド座標系との関係を記述する変換関数の推定値を求めることであって、カメラ座標系は、カメラの位置及び向きに関して定義された座標系であり、ワールド座標系は、ロボットのベースに対して固定である位置に関して定義された座標系であることにより、カメラキャリブレーションを実施するように構成される。制御回路は、カメラキャリブレーションが実施された後、通信インターフェースを介してカメラから後続する画像を受け取り、後続する画像に基づきかつ変換関数の推定値に基づく後続する移動コマンドを、通信インターフェースを介してロボットに出力することにより、ロボットアームの配置を制御するように、更に構成される。

10

【0131】

実施形態A2は、実施形態A1のロボット制御システムを含み、複数の位置は、仮想立方体の上に又は仮想立方体を通して一様に分散されている。

【0132】

実施形態A3は、実施形態A2のロボット制御システムを含み、複数の位置は、該複数の位置のうちの隣接する位置の間に、仮想立方体の縁に沿って測定される一様の間隔を有する。

【0133】

20

実施形態A4は、実施形態A1～A3のうちの任意の1つのロボット制御システムを含み、制御回路は、ロボットアームが仮想立方体の全ての角位置までキャリブレーションパターンを移動させることができるという判断に応じて、複数の位置までキャリブレーションパターンを移動させるようにロボットアームを制御するように構成されている。

【0134】

実施形態A5は、実施形態A4のロボット制御システムを含み、制御回路は、(a) ロボットアームが、仮想立方体の全ての角位置までキャリブレーションパターンを移動させることができるという判断、及び(b) ロボットアームが、仮想立方体の全ての角位置のうちの各角位置において、カメラに対する角度の定義された範囲内にある角度までキャリブレーションパターンを傾けることができるという判断に応じてのみ、複数の位置までキャリブレーションパターンを移動させるようにロボットアームを制御するように構成されている。

30

【0135】

実施形態A6は、実施形態A5のロボット制御システムを含み、仮想立方体は、制御回路によって求められる第2の仮想立方体である。この実施形態では、制御回路は、カメラ視野内に収まる第1の仮想立方体を求めるように更に構成される。制御回路は、ロボットアームが、第1の仮想立方体の1つ以上の角位置までキャリブレーションパターンを移動させることができないと判断するか、又は、ロボットアームが、第1の仮想立方体の1つ以上の角位置に対して、カメラに対する角度の定義された範囲内にある角度までキャリブレーションパターンを傾けることができないと判断するように更に構成される。制御回路は、(a) ロボットアームが第1の仮想立方体の1つ以上の角位置までキャリブレーションパターンを移動させることができないという判断、又は(b) ロボットアームが、第1の仮想立方体の1つ以上の角位置に対して、カメラに対する角度の定義された範囲内にある角度までキャリブレーションパターンを傾けることができないという判断のうちの少なくとも一方に応じて、第2の仮想立方体の全ての角位置を求めるように構成される。

40

【0136】

実施形態A7は、実施形態A6のロボット制御システムを含み、第1の仮想立方体は、カメラ視野内に収まることのできる最大サイズの仮想立方体であり、第2の仮想立方体は、第1の仮想立方体より小さい。

【0137】

50

実施形態 A 8 は、実施形態 A 1 ～ A 7 のうちの任意の 1 つのロボット制御システムを含み、複数の位置は厳密に n^3 個の位置を含み、 n は 2 以上の整数である。

【0138】

実施形態 A 9 は、実施形態 A 1 ～ A 8 のうちの任意の 1 つのロボット制御システムを含み、制御回路は、移動コマンドを介して、仮想立方体の上に又は仮想立方体を通して一様に分散される複数の位置に対してカメラに対する異なるそれぞれの角度までキャリブレーションパターンを傾けるように、ロボットアームを制御するように構成され、それにより、複数のそれぞれのキャリブレーション画像は、カメラに対する異なるそれぞれの角度におけるキャリブレーションパターンを取り込む。

【0139】

実施形態 A 10 は、実施形態 A 1 ～ A 9 のうちの任意の 1 つのロボット制御システムを含み、キャリブレーションパターンは複数のパターン要素を含み、制御回路は、複数のキャリブレーション画像が受け取られる前にカメラから第 1 のキャリブレーション画像を受け取るように構成され、第 1 のキャリブレーション画像は、キャリブレーションパターンの画像であり、複数のそれぞれのキャリブレーション画像が取り込まれる前にカメラによって取り込まれる。制御回路は、第 1 のキャリブレーション画像におけるパターン要素のうちの少なくとも 1 つの強度のレベル及びコントラストのレベルを求め、第 1 のキャリブレーション画像におけるパターン要素のうちの少なくとも 1 つの強度のレベル及びコントラストのレベルのうちの少なくとも一方に基づき、カメラの露出パラメーター及び焦点パラメーターのそれぞれの値を求めるように更に構成されている。複数のそれぞれのキャリブレーション画像は、当該露出パラメーター及び焦点パラメーターのそれぞれの値を備えたカメラによって取り込まれる。

【0140】

実施形態 A 11 は、実施形態 A 4 ～ A 10 のうちの任意の 1 つのロボット制御システムを含み、制御回路は、仮想立方体を複数の非オーバーラップ領域に分割することにより、かつ、複数の位置のそれぞれの位置を複数の非オーバーラップ領域の各領域となるように割り当てることにより、複数の位置を求めるように構成されている。

【0141】

実施形態 A 12 は、実施形態 A 4 ～ A 11 のうちの任意の 1 つのロボット制御システムを含み、制御回路は、一連の反復にわたり複数の位置を求めるように構成され、該複数の位置のうちの第 1 の位置は、仮想立方体内の任意の位置として求められ、かつ、一連の反復のうちの第 1 の反復の間に求められ、仮想立方体は、第 1 の反復を実施するために使用される第 1 の領域を形成する。この実施形態では、残りの反復に対するそれぞれの位置は、該残りの反復の各々に対し、(a) 先行する反復を実施するために使用された領域を、互いにオーバーラップしない第 1 の半分領域及び第 2 の半分領域に分割することであって、該第 1 の半分領域及び該第 2 の半分領域の各々は、現反復を実施するために使用される領域であることと、(b) 第 1 の半分領域及び第 2 の半分領域のうちのいずれが先行する位置を含むかを判断することであって、該先行する位置は、先行する反復において求められた複数の位置のそれぞれの位置であることと、(c) 現位置として、第 1 の半分領域及び第 2 の半分領域のうちの他方における任意の位置を求めることであって、現位置は、現反復に対して求められる複数の位置のうちの 1 つの位置であることとを実施することにより、求められる。

【0142】

実施形態 A 13 は、ロボット制御を実施する方法に関する。この実施形態では、方法は、a) ロボット制御システムにより、カメラ視野を示す情報を求めることであって、ロボット制御システムは、カメラと通信し、かつ、ベース、ロボットアーム及び該ロボットアームに配置されたキャリブレーションパターンを有するロボットと通信するように構成された通信インターフェースを備え、カメラ視野はカメラの視野であることと、b) ロボット制御システムにより、カメラ視野内に収まる仮想立方体の全ての角位置を求めることと、c) ロボット制御システムにより、仮想立方体の上に又は仮想立方体を通して分散され

る複数の位置を求めることと、d) ロボット制御システムにより、通信インターフェースに移動コマンドを出力することであって、該通信インターフェースは、ロボットに移動コマンドを通信して、ロボットアームに対し、仮想立方体の上に又は仮想立方体を通して分散される複数の位置までキャリブレーションパターンを移動させるように構成されることと、e) ロボット制御システムにより、通信インターフェースから複数のキャリブレーション画像を受け取ることであり、該通信インターフェースは、カメラから複数のキャリブレーション画像を受け取るように構成され、該複数のキャリブレーション画像は、カメラにより取り込まれ、複数の位置におけるキャリブレーションパターンの複数のそれぞれの画像であることと、f) ロボット制御システムにより、複数のキャリブレーション画像に基づき固有カメラパラメーターのそれぞれの推定値を求めることと、g) ロボット制御システムにより、固有カメラパラメーターのそれぞれの推定値に基づき、カメラ座標系とワールド座標系との関係を記述する変換関数の推定値を求めることであって、カメラ座標系は、通信インターフェースが通信するように構成されるカメラの位置及び向きに関して定義された座標系であり、ワールド座標系は、通信インターフェースが通信するように構成されるロボットのベースに対して固定である位置に関して定義される座標系であることと、h) ロボット制御システムにより、通信インターフェースから後続する画像を受け取ることであり、該通信インターフェースは、固有カメラパラメーターのそれぞれの推定値と変換関数の推定値とを求めた後、カメラから後続する画像を受け取るように構成されることと、i) ロボット制御システムにより、後続する画像に基づき、かつ、変換関数の推定値に基づき、後続する移動コマンドを生成することと、j) ロボット制御システムにより、通信インターフェースに後続する移動コマンドを出力することであって、該通信インターフェースは、ロボットアームの配置を制御するようにロボットに後続する移動コマンドを通信するように構成されることとを含む。

【0143】

実施形態A14は、ロボット制御システムの制御回路によって実行されると、制御回路に対して、a) カメラ視野を示す情報を求めることであって、ロボット制御システムは、カメラと通信し、かつ、ベース、ロボットアーム及び該ロボットアームに配置されたキャリブレーションパターンを有するロボットと通信するように構成された通信インターフェースを備え、カメラ視野はカメラの視野であることと、b) カメラ視野内に収まる仮想立方体の全ての角位置を求めることと、c) 仮想立方体の上に又は仮想立方体を通して分散される複数の位置を求めることと、d) 通信インターフェースに移動コマンドを出力することであって、通信インターフェースは、ロボットに移動コマンドを通信して、ロボットアームに対し、仮想立方体の上に又は仮想立方体を通して分散される複数の位置までキャリブレーションパターンを移動させるように構成されることと、e) 通信インターフェースから複数のキャリブレーション画像を受け取ることであり、通信インターフェースは、カメラから複数のキャリブレーション画像を受け取るように構成され、複数のキャリブレーション画像は、カメラにより取り込まれ、複数の位置におけるキャリブレーションパターンの複数のそれぞれの画像であることと、f) 複数のキャリブレーション画像に基づき固有カメラパラメーターのそれぞれの推定値を求めることと、g) 固有カメラパラメーターのそれぞれの推定値に基づき、カメラ座標系とワールド座標系との関係を記述する変換関数の推定値を求めることであって、カメラ座標系は、通信インターフェースが通信するように構成されるカメラの位置及び向きに関して定義された座標系であり、ワールド座標系は、通信インターフェースが通信するように構成されるロボットのベースに対して固定である位置に関して定義される座標系であることとにより、カメラキャリブレーションを実施させる命令が記憶されている非一時的コンピューター可読媒体に関する。命令は、制御回路によって実行されると、制御回路に対し更に、通信インターフェースから後続する画像を受け取らせ、通信インターフェースは、固有カメラパラメーターのそれぞれの推定値と変換関数の推定値とを求めた後にカメラから後続する画像を受け取るように構成される。制御回路はまた、後続する画像に基づきかつ変換関数の推定値に基づく後続する移動コマンドを、通信インターフェースを介してロボットに出力することにより、ロボット

アームの配置を制御するように構成される。

【0144】

実施形態B1は、通信インターフェース及び制御回路を備えるロボット制御システムに関する。通信インターフェースは、ベースとキャリブレーションパターンが配置されているロボットアームとを有するロボット、及びカメラ視野を有するカメラと通信するように構成される。キャリブレーションパターンは、パターン座標系においてそれぞれの定義されたパターン要素位置を有する複数のパターン要素を含み、パターン座標系は、キャリブレーションパターンの位置及び向きに関して定義された座標系である。制御回路は、a) 通信インターフェースを介してロボットに移動コマンドを出力することにより、カメラ視野内の少なくとも1つの位置までキャリブレーションパターンを移動させるようにロボットアームを制御することと、b) 通信インターフェースを介してカメラからキャリブレーション画像を受け取ることであって、キャリブレーション画像は、カメラによって取り込まれ、少なくとも1つの位置におけるキャリブレーションパターンの画像であることと、c) 複数のパターン要素がキャリブレーション画像に現れるそれぞれの位置を示す複数の画像パターン要素位置を求めることと、d) 複数の画像パターン要素位置に基づき、かつ、定義されたパターン要素位置に基づき、第1の固有カメラパラメーターの第1の推定値を求めることと、e) 第1の固有カメラパラメーターの第1の推定値が求められた後、第1の固有カメラパラメーターの第1の推定値に基づき、かつ、複数の画像パターン要素位置に基づき、第2の固有カメラパラメーターの第1の推定値を求めることと、f) 第2の固有カメラパラメーターの第1の推定値に基づき、かつ、複数の画像パターン要素位置及び定義されたパターン要素位置に基づき、第1の固有カメラパラメーターの第2の推定値及び第2の固有カメラパラメーターの第2の推定値を求めることと、g) 第1の固有カメラパラメーターの第2の推定値及び第2の固有カメラパラメーターの第2の推定値に基づき、カメラ座標系とワールド座標系との関係を記述する変換関数の推定値を求めることであって、カメラ座標系は、カメラの位置及び向きに関して定義された座標系であり、ワールド座標系は、ロボットのベースに対して固定である位置に関して定義された座標系であることにより、カメラキャリブレーションを実施するように構成される。制御回路は、カメラキャリブレーションが実施された後、カメラから後続する画像を受け取り、後続する画像に基づきかつ変換関数の推定値に基づく後続する移動コマンドをロボットに出力することにより、ロボットアームの配置を制御するように更に構成される。

【0145】

実施形態B2は、実施形態B1のロボット制御システムを含み、変換関数は第2の変換関数であり、制御回路は、第1の固有カメラパラメーターの第2の推定値及び第2の固有カメラパラメーターの第2の推定値に基づき、パターン座標系とカメラ座標系との関係を記述する第1の変換関数の推定値を更に求めることにより、カメラキャリブレーションを実施するように構成され、第2の変換関数は第1の変換関数に基づいて求められる。

【0146】

実施形態B3は、実施形態B1又はB2のロボット制御システムを含み、カメラはレンズ及び画像センサーを備え、第1の固有カメラパラメーターは、画像センサー上の像射影を記述する射影行列であり、第2の固有カメラパラメーターは、レンズによってもたらされるレンズ歪みを記述する歪みパラメーターである。

【0147】

実施形態B4は、実施形態B1～B3のうちの任意の1つのロボット制御システムを含む。この実施形態では、制御回路は、(a) 第2の固有カメラパラメーターの初期推定値を求めることと、(b) 第2の固有カメラパラメーターの初期推定値、第1の固有カメラパラメーターの第1の推定値、及びキャリブレーション画像に基づき、レンズによってもたらされる歪みを補償するキャリブレーション画像の変更されたバージョンを生成することと、(c) キャリブレーション画像の変更されたバージョンにおける湾曲の量を求めることと、(d) キャリブレーション画像の変更されたバージョンにおける湾曲の量に基づき第2の固有カメラパラメーターの初期推定値を調整して、湾曲の量を低減させる第2の

固有カメラパラメーターの調整された推定値を生成することであって、調整された推定値は第2の固有カメラパラメーターの第1の推定値であることとにより、第2の固有カメラパラメーターの第1の推定値を求めるように構成されている。

【0148】

実施形態B5は、実施形態B4のロボット制御システムを含み、キャリブレーションパターンにおける複数のパターン要素は複数のドットであり、制御回路は、キャリブレーション画像の変更されたバージョンにおける複数のドットを通して複数の直線を当てはめることと、複数の直線のうちの各直線と該直線が当てはめられる複数のドットのそれぞれのドットとの間のそれぞれの距離に基づき、湾曲の量を求めることとにより、湾曲の量を求めるように構成されている。

10

【0149】

実施形態B6は、実施形態B2～B5のうちの任意の1つのロボット制御システムを含む。この実施形態では、制御回路は、(a)第1の変換関数の推定値、第2の固有カメラパラメーターの第2の推定値、及び第1の固有カメラパラメーターの第2の推定値に基づき、キャリブレーションパターンのシミュレートされた画像であるシミュレートキャリブレーション画像を求めることと、(b)シミュレートキャリブレーション画像とカメラによって取り込まれるキャリブレーション画像との差を求めることと、(c)差に基づき第2の固有カメラパラメーターの第2の推定値及び第1の固有カメラパラメーターの第2の推定値を調整して、差を低減させる、第2の固有カメラパラメーターの調整された推定値及び第1の固有カメラパラメーターの調整された推定値を生成することであって、第2の固有カメラパラメーターの調整された推定値は該第2の固有カメラパラメーターの第3の推定値であり、第1の固有カメラパラメーターの調整された推定値は該第1の固有カメラパラメーターの第3の推定値であることとによって、第2の固有カメラパラメーターの第3の推定値及び第1の固有カメラパラメーターの第3の推定値を求めるように更に構成される。さらに、この実施形態では、第1の変換関数の推定値は、第2の固有カメラパラメーターの第3の推定値と第1の固有カメラパラメーターの第3の推定値とに基づいて求められる。

20

【0150】

実施形態B7は、実施形態B2～B6のうちの任意の1つのロボット制御システムを含み、ロボットアームは、キャリブレーションパターンが配置されるリンクを備える。この実施形態では、制御回路は、さらに、ワールド座標系とリンク座標系との関係を記述する第3の変換関数の推定値を求めることであって、リンク座標系は、リンクにおける位置に関して定義された座標系であることと、パターン座標系とリンク座標系との関係を記述する第4の変換関数の推定値を求めることであって、第2の変換関数の推定値と第4の変換関数の推定値とは、ともに、第1の変換関数の推定値と第3の変換関数の推定値とに基づいて求められることとにより、カメラキャリブレーションを実施するように構成されている。

30

【0151】

実施形態B8は、実施形態B7のロボット制御システムを含み、制御回路は、さらに、a)第4の変換関数の推定値、第3の変換関数の推定値、第2の変換関数の推定値、及び第1の固有カメラパラメーターの第2の推定値に基づき、キャリブレーションパターンのシミュレートされた画像であるシミュレートキャリブレーション画像を求めることと、b)第2の固有カメラパラメーターの第2の推定値に基づき、カメラのレンズによってもたらされる歪みを補償するように、該カメラによって取り込まれるキャリブレーション画像の変更されたバージョンを求めることと、c)シミュレートキャリブレーション画像とキャリブレーション画像の変更されたバージョンとの差を求めることと、d)シミュレートキャリブレーション画像とキャリブレーション画像の変更されたバージョンとの差を低減させるように、少なくとも第4の変換関数の推定値及び第2の変換関数の推定値を調整することとにより、カメラキャリブレーションを実施するように構成されている。

40

【0152】

50

実施形態 B 9 は、実施形態 B 1 ～ B 8 のうちの任意の 1 つのロボット制御システムを含み、通信インターフェースが通信するように構成されているカメラは第 1 のカメラであり、カメラ座標系は第 1 のカメラ座標系であり、通信インターフェースは、第 2 のカメラと通信するように構成される。この実施形態では、制御回路は、第 1 のカメラ座標系と第 2 のカメラ座標系との関係を更に求めることによりカメラキャリブレーションを実施するように構成され、第 2 のカメラ座標系は、第 2 のカメラの位置及び向きに関して定義される。

【0153】

実施形態 B 10 は、ロボット制御を実施する方法であって、a) ロボット制御システムにより、該ロボット制御システムの通信インターフェースに出力する移動コマンドを生成することであって、該通信インターフェースは、ベースとキャリブレーションパターンが配置されているロボットアームとを有するロボットと通信するように構成され、カメラ視野を有するカメラと通信するように構成されることと、b) ロボット制御システムにより、通信インターフェースに移動コマンドを出力することであって、該通信インターフェースは、ロボットに移動コマンドを通信して、ロボットアームがカメラ視野内の少なくとも 1 つの位置までキャリブレーションパターンを移動させるように構成されることと、c) ロボット制御システムにより、通信インターフェースからキャリブレーション画像を受け取ることであって、該通信インターフェースは、カメラからキャリブレーション画像を受け取るように構成され、該キャリブレーション画像は、カメラ視野内の少なくとも 1 つの位置におけるキャリブレーションパターンの画像であり、該キャリブレーションパターンは、パターン座標系におけるそれぞれの定義されたパターン要素位置を有する複数のパターン要素を含み、パターン座標系は、キャリブレーションパターンの位置及び向きに関して定義された座標系であることと、d) ロボット制御システムにより、キャリブレーション画像から複数の画像パターン要素位置を求めることであって、該複数の画像パターン要素位置は、複数のパターン要素がキャリブレーション画像に現れるそれぞれの位置を示すことと、e) ロボット制御システムにより、複数の画像パターン要素位置に基づき、かつ定義されたパターン要素位置に基づき、第 1 の固有カメラパラメーターの第 1 の推定値を求めることと、f) ロボット制御システムにより、第 1 の固有カメラパラメーターの第 1 の推定値が求められた後、第 1 の固有カメラパラメーターの第 1 の推定値に基づき、かつ複数の画像パターン要素位置に基づき、第 2 の固有カメラパラメーターの第 1 の推定値を求めることと、g) ロボット制御システムにより、第 2 の固有カメラパラメーターの第 1 の推定値に基づき、かつ複数の画像パターン要素位置及び定義されたパターン要素位置に基づき、第 1 の固有カメラパラメーターの第 2 の推定値と第 2 の固有カメラパラメーターの第 2 の推定値とを求めることと、h) ロボット制御システムにより、第 1 の固有カメラパラメーターの第 2 の推定値と第 2 の固有カメラパラメーターの第 2 の推定値とに基づき、カメラ座標系とワールド座標系との関係を記述する変換関数の推定値を求めることであって、カメラ座標系は、通信インターフェースが通信するように構成されるカメラの位置及び向きに関して定義された座標系であり、ワールド座標系は、通信インターフェースが通信するように構成されるロボットのベースに対して固定である位置に関して定義された座標系であることと、i) ロボット制御システムにより、通信インターフェースから後続する画像を受け取ることであって、該通信インターフェースは、変換関数の推定値が求められた後にカメラから後続する画像を受け取るように構成されることと、j) ロボット制御システムにより、後続する画像に基づき、かつ変換関数の推定値に基づき、後続する移動コマンドを生成することと、k) ロボット制御システムにより、通信インターフェースに後続する移動コマンドを出力することであって、該通信インターフェースは、ロボットアームの配置を制御するようにロボットに後続する移動コマンドを出力するように構成されることとを含む、方法に関する。

【0154】

実施形態 B 11 は、ロボット制御システムの制御回路によって実行されると、制御回路に対して a) ロボット制御システムの通信インターフェースに出力する移動コマンドを生

10

20

30

40

50

成することであって、通信インターフェースは、ベースとキャリブレーションパターンが配置されているロボットアームとを有するロボットと通信し、かつカメラ視野を有するカメラと通信するように構成されることと、b) 通信インターフェースに移動コマンドを出力することであって、通信インターフェースは、ロボットに移動コマンドを通信して、ロボットアームがカメラ視野内の少なくとも1つの位置までキャリブレーションパターンを移動させるように構成されることと、c) 通信インターフェースからキャリブレーション画像を受け取ることであって、通信インターフェースは、カメラからキャリブレーション画像を受け取るように構成され、キャリブレーション画像は、カメラ視野内の少なくとも1つの位置におけるキャリブレーションパターンの画像であり、キャリブレーションパターンは、パターン座標系におけるそれぞれの定義されたパターン要素位置を有する複数のパターン要素を含み、パターン座標系は、キャリブレーションパターンの位置及び向きに関して定義された座標系であることと、d) キャリブレーション画像から複数の画像パターン要素位置を求めることであって、複数の画像パターン要素位置は、複数のパターン要素が前記キャリブレーション画像に現れるそれぞれの位置を示すことと、e) 複数の画像パターン要素位置に基づき、かつ定義されたパターン要素位置に基づき、第1の固有カメラパラメータの第1の推定値を求めることと、f) 第1の固有カメラパラメータの第1の推定値が求められた後、第1の固有カメラパラメータの第1の推定値に基づき、かつ複数の画像パターン要素位置に基づき、第2の固有カメラパラメータの第1の推定値を求めることと、g) 第2の固有カメラパラメータの第1の推定値に基づき、かつ複数の画像パターン要素位置及び定義されたパターン要素位置に基づき、第1の固有カメラパラメータの第2の推定値と第2の固有カメラパラメータの第2の推定値とを求めることと、h) 第1の固有カメラパラメータの第2の推定値と第2の固有カメラパラメータの第2の推定値とに基づき、カメラ座標系とワールド座標系との関係を記述する変換関数の推定値を求めることであって、カメラ座標系は、通信インターフェースが通信するように構成されるカメラの位置及び向きに関して定義された座標系であり、ワールド座標系は、通信インターフェースが通信するように構成されるロボットのベースに対して固定である位置に関して定義された座標系であることとにより、カメラキャリブレーションを実施させる命令が記憶されている非一時的コンピューター可読媒体に関する。命令は、制御回路によって実行されると、制御回路に対し更に、通信インターフェースから後続する画像を受け取らせ、通信インターフェースは、カメラキャリブレーションが実施された後、カメラから後続する画像を受け取り、後続する画像に基づきかつ変換関数の推定値に基づく後続する移動コマンドを、通信インターフェースを介してロボットに出力することにより、ロボットアームの配置を制御するように構成される。

【0155】

種々の実施形態を上述してきたが、これらの実施形態は、限定としてではなく本発明の単なる説明及び例として提示されていることを理解すべきである。形式及び細部における種々の変更は本発明の趣旨及び範囲から逸脱することなく本発明内で行うことができることは当業者には明らかであろう。したがって、本発明の範囲(breadth and scope)は、上述の例示的な実施形態のいずれかによって限定されるべきではなく、添付の特許請求の範囲及びそれらの均等物によってのみ規定されるべきである。本明細書において論考された各実施形態、及び本明細書において引用された各引用文献の各特徴は、他の任意の実施形態の特徴と組み合わせて用いることができることも理解されるであろう。本明細書において論考された全ての特許及び刊行物は、引用することによりその全体が本明細書の一部分をなす。

【要約】

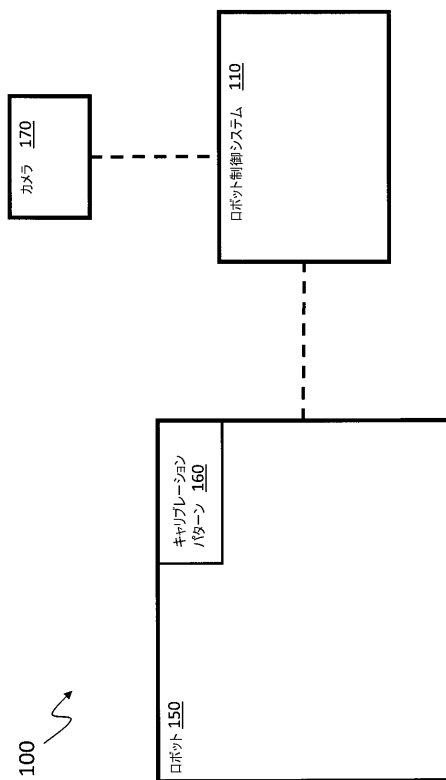
【課題】ロボット制御システム及び自動カメラキャリブレーション方法を提示する。

【解決手段】ロボット制御システムは、カメラ視野内に収まる仮想立方体の全ての角位置を求め、仮想立方体の上に又は仮想立方体を通して分散される複数の位置を求めるように構成された制御回路を備える。制御回路は、複数の位置にキャリブレーションパターンを移動させるようにロボットアームを制御し、複数の位置に対応する複数のキャリブレーション

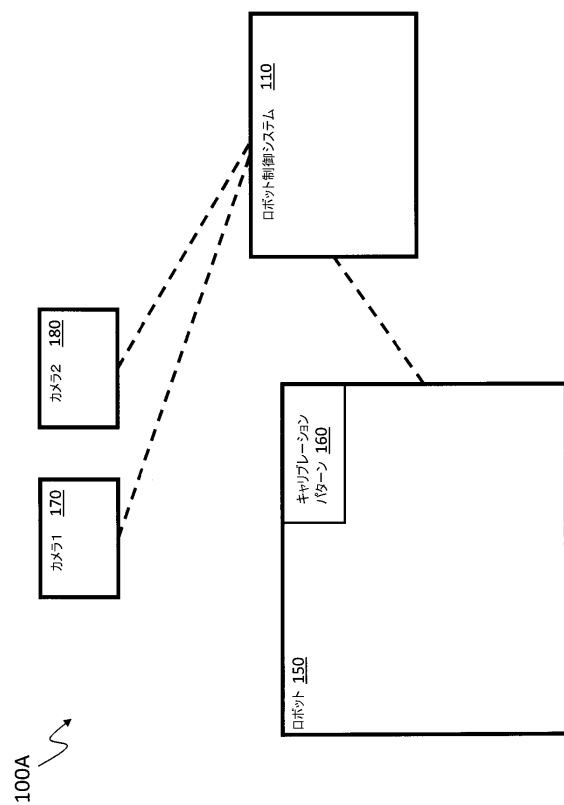
ョン画像を受け取り、複数のキャリブレーション画像に基づき固有カメラパラメータのそれぞれの推定値を求め、カメラ座標系とワールド座標系との関係を記述する変換関数の推定値を求めるように更に構成される。制御回路は、変換関数の推定値に基づきロボットアームの配置を制御するように更に構成される。

【選択図】 図 4

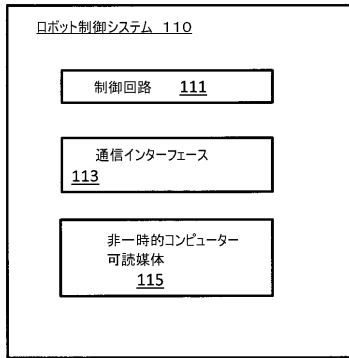
【図 1 A】



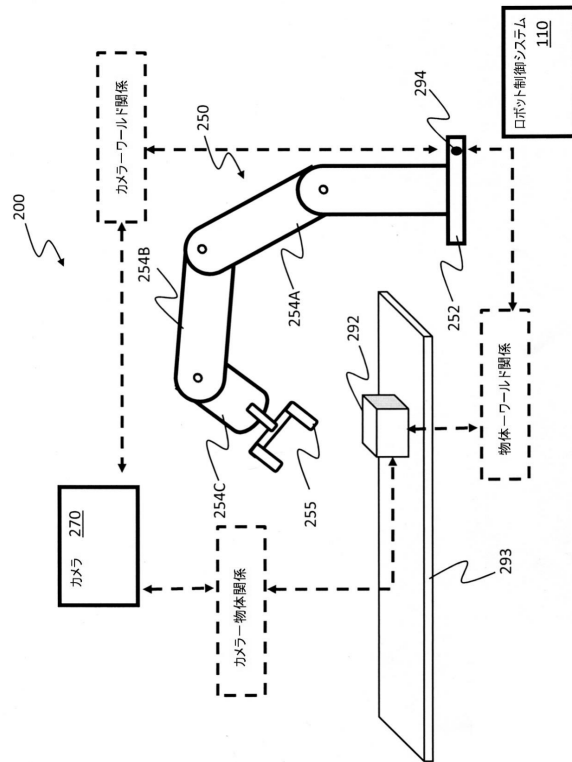
【図 1 B】



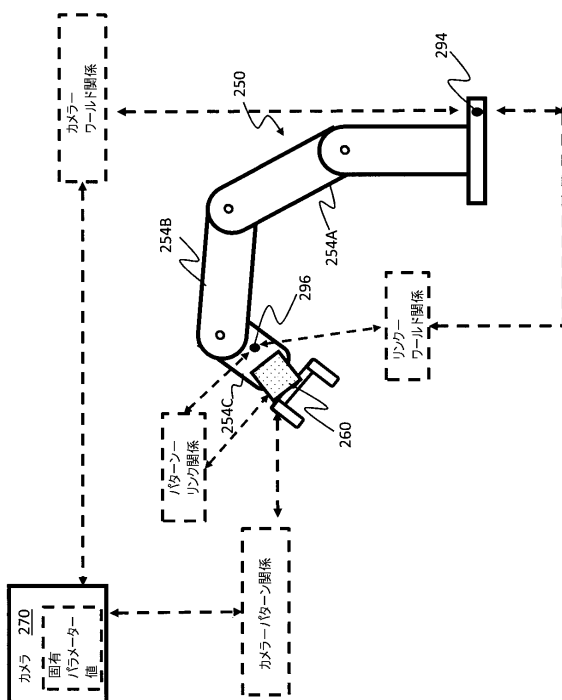
【図 1 C】



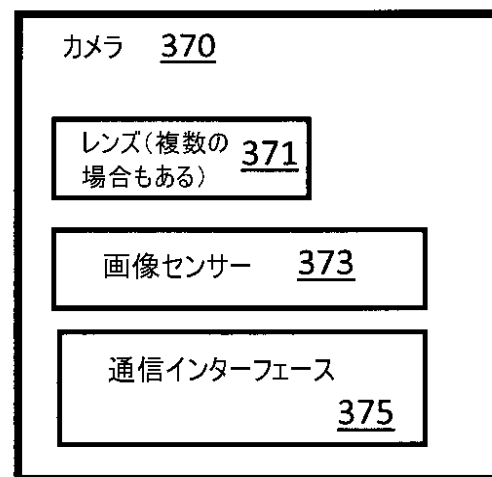
【図 2 A】



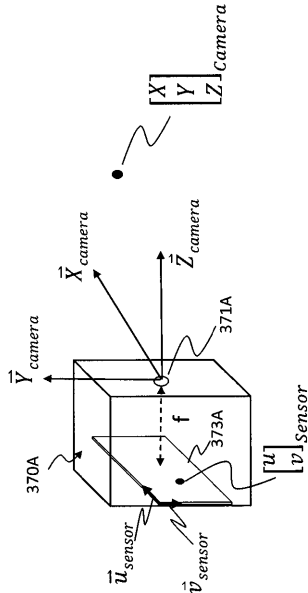
【図 2 B】



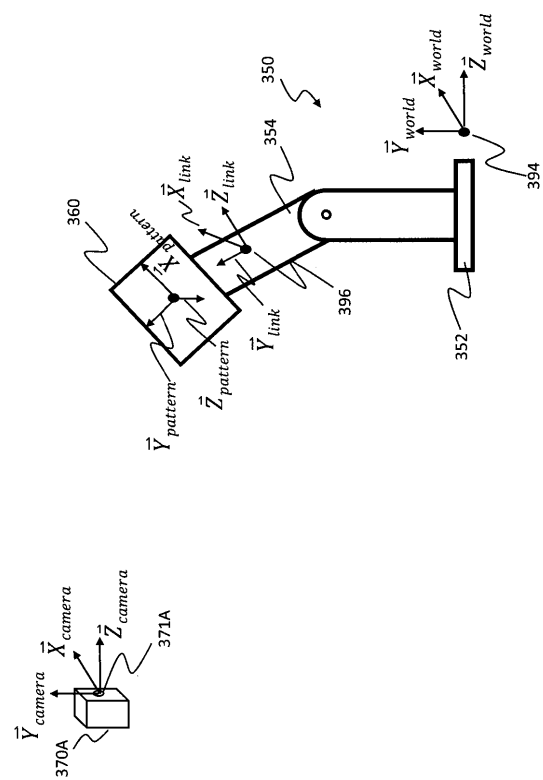
【図 3 A】



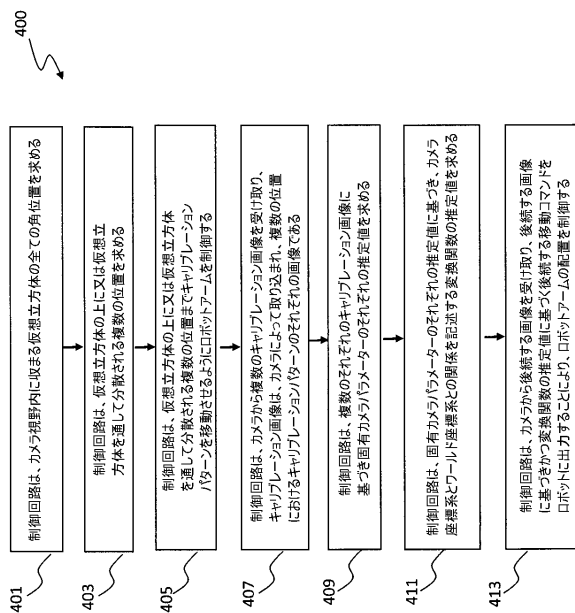
【図 3 B】



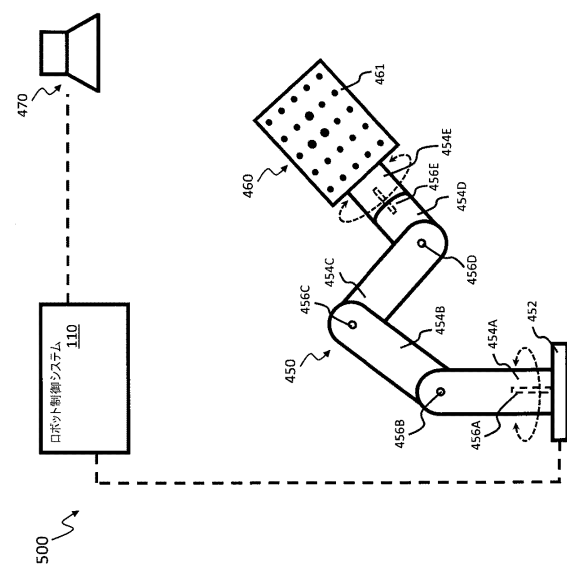
【図 3 C】



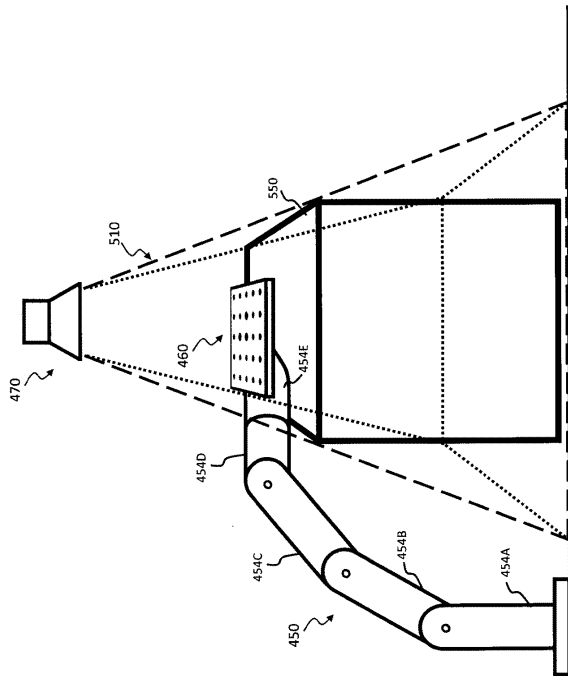
【図 4】



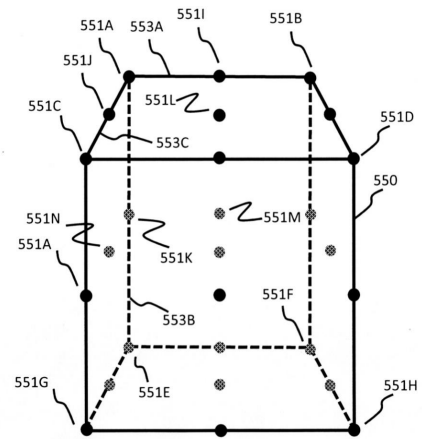
【図 5 A】



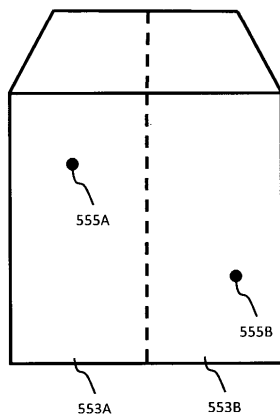
【図 5 B】



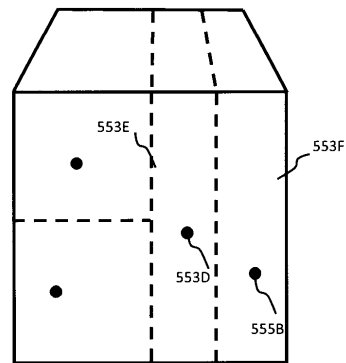
【図 5 C】



【図 5 D】

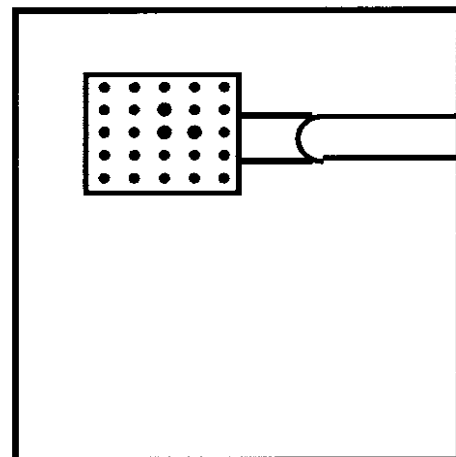
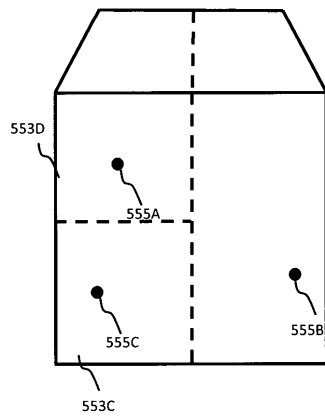


【図 5 F】

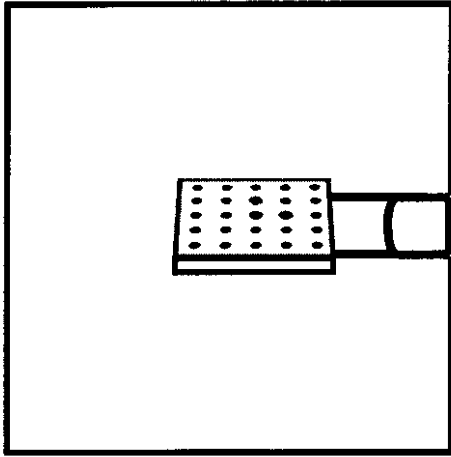


【図 6 A】

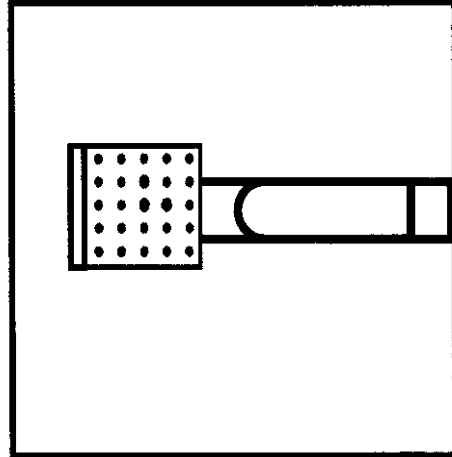
【図 5 E】



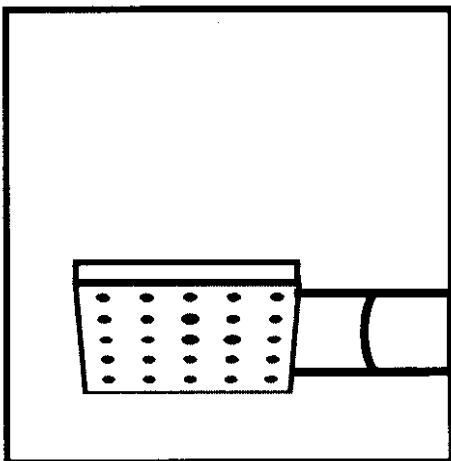
【図 6 B】



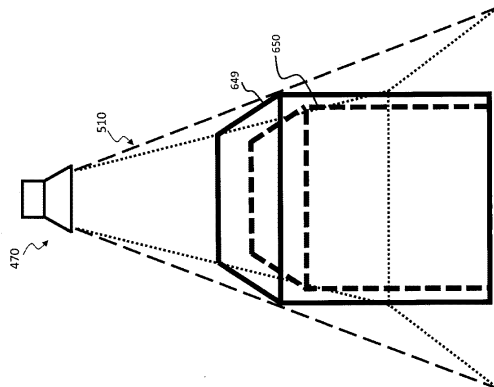
【図 6 C】



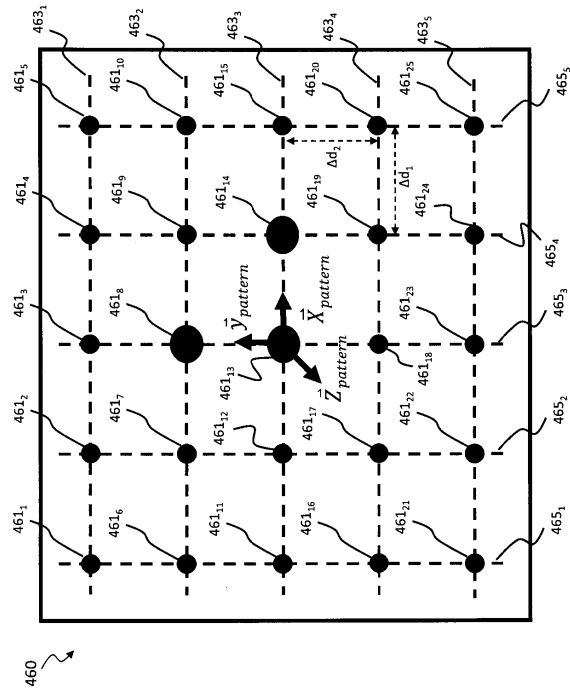
【図 6 D】



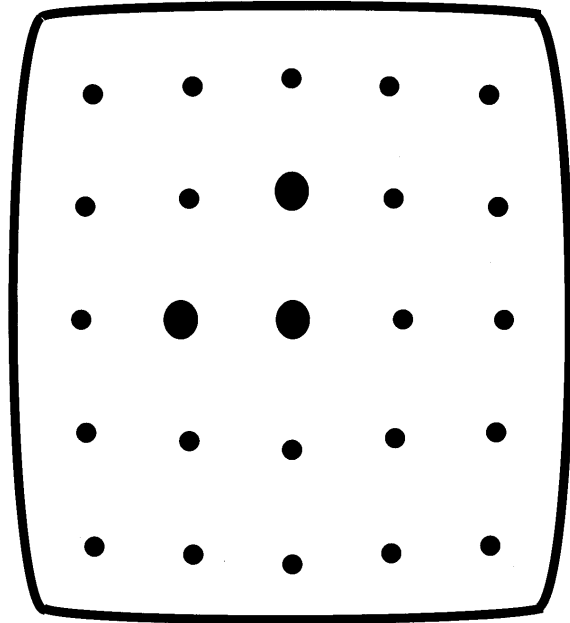
【図 7】



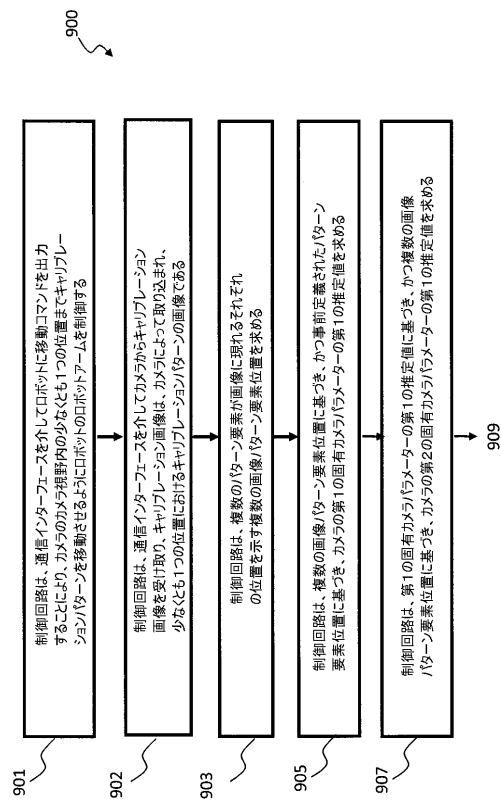
【図 8 A】



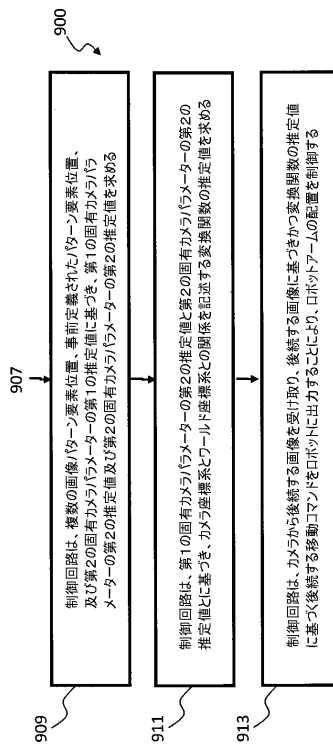
【図 8 B】



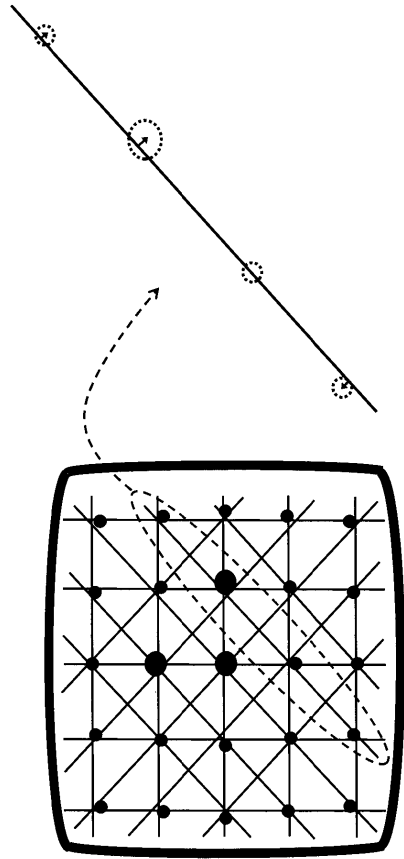
【図 9 A】



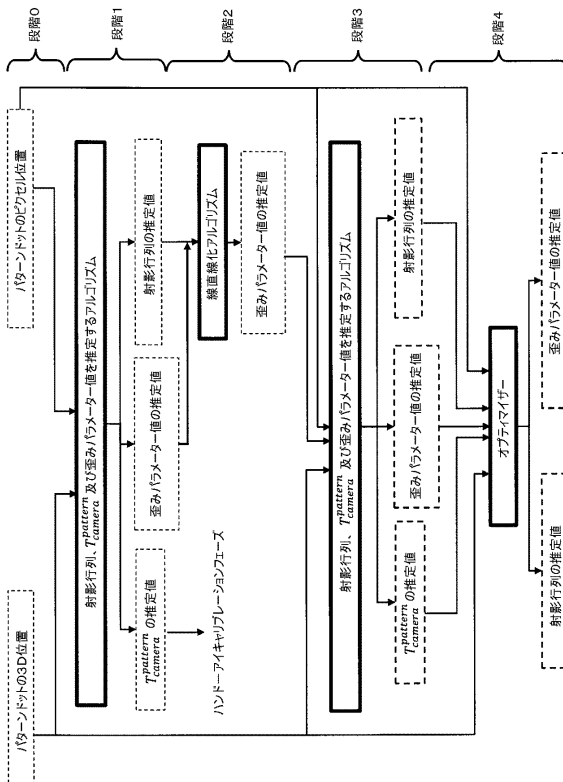
【図 9 B】



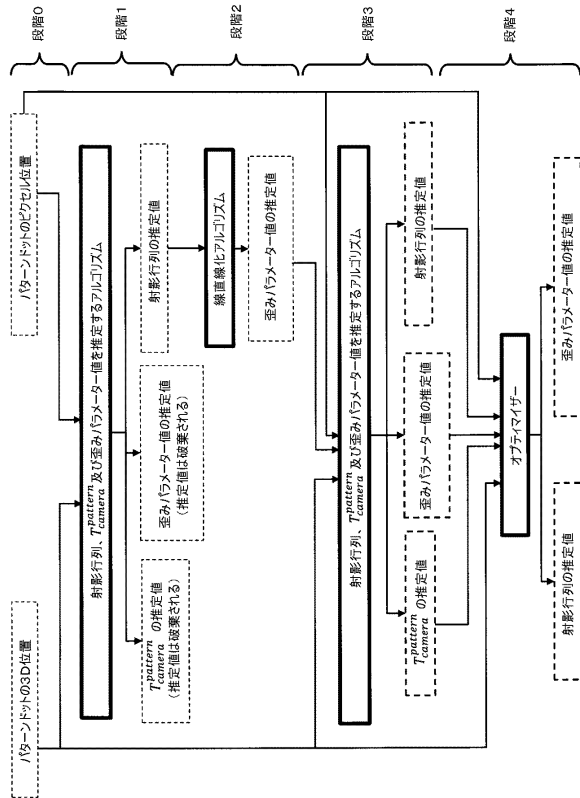
【図10】



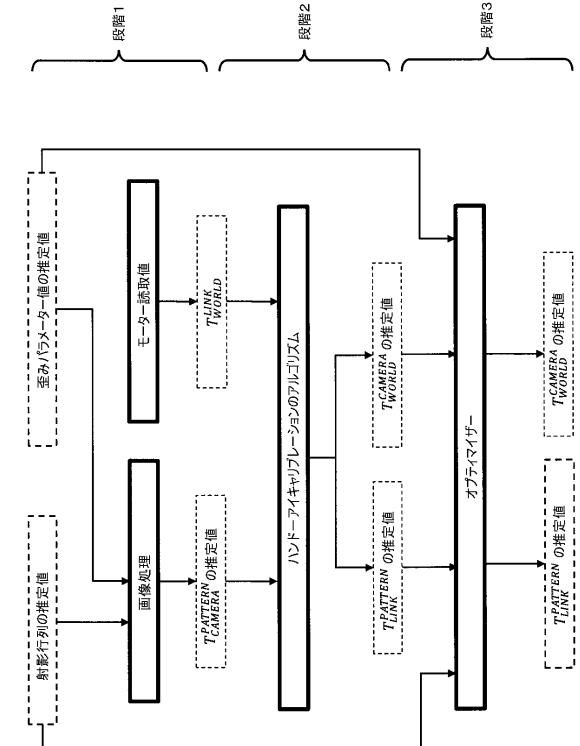
【図11B】



【図11A】



【図12】



フロントページの続き

- (74)代理人 100107401
弁理士 高橋 誠一郎
- (74)代理人 100120064
弁理士 松井 孝夫
- (74)代理人 100182257
弁理士 川内 英主
- (74)代理人 100202119
弁理士 岩附 秀幸
- (72)発明者 ラッセル イスラム
日本国 130-0002 東京都墨田区業平1丁目1-9
- (72)発明者 ズタオ イー
日本国 130-0002 東京都墨田区業平1丁目1-9
- (72)発明者 ローゼン, ダイアンコフ
日本国 130-0002 東京都墨田区業平1丁目1-9

審査官 貞光 大樹

- (56)参考文献 特開2018-111166 (JP, A)
特開2010-172986 (JP, A)
特開2015-174191 (JP, A)
特開2016-97474 (JP, A)
特表2013-526423 (JP, A)
特開2015-182144 (JP, A)

- (58)調査した分野(Int.Cl., DB名)
- | | | | |
|------|-------|---|-------|
| G06T | 7/00 | — | 7/90 |
| B25J | 1/00 | — | 21/02 |
| G01B | 11/00 | | |