

(19) 日本国特許庁(JP)

(12) 特 許 公 報(B2)

(11) 特許番号

特許第5019478号  
(P5019478)

(45) 発行日 平成24年9月5日(2012.9.5)

(24) 登録日 平成24年6月22日(2012.6.22)

(51) Int.Cl.		F I			
GO 1 C	15/06	(2006.01)	GO 1 C	15/06	T
GO 1 C	15/00	(2006.01)	GO 1 C	15/00	I O 3 A
GO 1 B	11/00	(2006.01)	GO 1 B	11/00	H

請求項の数 2 (全 21 頁)

(21) 出願番号	特願2008-247348 (P2008-247348)	(73) 特許権者	505374783
(22) 出願日	平成20年9月26日(2008.9.26)		独立行政法人日本原子力研究開発機構
(65) 公開番号	特開2010-78466 (P2010-78466A)		茨城県那珂郡東海村村松4番地49
(43) 公開日	平成22年4月8日(2010.4.8)	(74) 代理人	100074631
審査請求日	平成21年12月3日(2009.12.3)		弁理士 高田 幸彦
		(72) 発明者	石井 裕剛
			京都府宇治市五ヶ庄
			国立大学法人京都大
			学内
		(72) 発明者	下田 宏
			京都府宇治市五ヶ庄
			国立大学法人京都大
			学内

最終頁に続く

(54) 【発明の名称】 マーカ自動登録方法及びシステム

(57) 【特許請求の範囲】

【請求項1】

環境の基準となる位置及び適宜な位置にマーカを貼り付け、ビデオカメラで撮影可能かつレーザ距離計測器で距離を計測可能な範囲にある総てのマーカの世界座標系で表された3次元位置と方向を全自動で計測して記憶する方法であって、

前記マーカとして、四角形の台紙の中心に配置した1つの大円と、台紙の4隅に配置した4つの小円を備え、前記大円は、10個の同型の扇形を円環状に配置し、白色の扇形を0、黒色の扇形を1とすることにより、各マーカのID番号を表現するように構成したものを使用し、

ビデオカメラの焦点距離を設定可能な最も短い値に設定する第1のステップと、

焦点距離を設定可能な最も短い値に設定した前記ビデオカメラの稼動範囲の総ての領域を最低1回は撮影するように等間隔でビデオカメラの撮影方向を回転させ、各撮影方向において、ビデオカメラを用いて撮影してマーカとの間の距離と存在する方向を求めるアルゴリズムを実行することにより、環境に貼り付けられたマーカとの距離と存在する方向を認識して記憶する第2のステップと、

ビデオカメラの焦点距離を最も短い値の2倍の値および3倍の値に設定して前記第2のステップを繰り返す第3のステップと、

第1のステップから第3のステップにより認識して記憶した個々のマーカに対してレーザ距離計測器を用いてマーカ上の1点の位置を計測するアルゴリズムを実行することにより、認識した総てのマーカの3次元位置と方向を計測して記憶する第4のステップと、

10

20

第4のステップで記憶した総てのマーカの3次元位置と方向に対して、マーカの位置と方向を世界座標系に変換するアルゴリズムを適用して世界座標系で表された3次元位置と方向を求めて記憶する第5のステップを行うことを特徴とするマーカ自動登録方法。

【請求項2】

環境の基準となる位置及び適宜な位置に貼り付けられたマーカのうち、ビデオカメラで撮影可能かつレーザ距離計測器で距離を計測可能な範囲にある総てのマーカの世界座標系で表された3次元位置と方向を全自動で計測して記憶するシステムであって、

電動雲台によって向きを変えることができるようにしたビデオカメラと、電動雲台によって向きを変えることができるようにしたレーザ距離計測器と、前記ビデオカメラとレーザ距離計測器電動雲台と接続されてこれらを制御する小型コンピュータとを備え、

前記マーカは、四角形の台紙の中心に配置した1つの大円と、台紙の4隅に配置した4つの小円を備え、前記大円は、10個の同型の扇形を円環状に配置し、白色の扇形を0、黒色の扇形を1とすることにより、各マーカのID番号を表現するように構成し、

前記小型コンピュータは、

前記ビデオカメラの焦点距離を設定可能な最も短い値に設定する第1のステップと、

焦点距離を設定可能な最も短い値に設定した前記ビデオカメラの稼動範囲の総ての領域を最低1回は撮影するように等間隔でビデオカメラの撮影方向を回転させ、各撮影方向において、前記ビデオカメラを用いて撮影してマーカとの間の距離と存在する方向を求めるアルゴリズムを実行することにより、環境に貼り付けられたマーカとの距離と存在する方向を認識して記憶する第2のステップと、

前記ビデオカメラの焦点距離を最も短い値の2倍の値および3倍の値に設定して前記第2のステップを繰り返す第3のステップと、

第1ステップから第3のステップにより認識して記憶した個々のマーカに対して前記レーザ距離計測器を用いてマーカ上の1点の位置を計測するアルゴリズムを実行することにより、認識した総てのマーカの3次元位置と方向を計測して記憶する第4のステップと、

第4のステップで記憶した総てのマーカの3次元位置と方向に対して、マーカの位置と方向を世界座標系に変換するアルゴリズムを適用して世界座標系で表された3次元位置と方向を求めて記憶する第5のステップを行うプログラムを備えたことを特徴とするマーカ自動登録システム。

【発明の詳細な説明】

【技術分野】

【0001】

本発明は、拡張現実感の運用等に用いるのに好適なマーカの自動登録方法及びシステムに関する。

【背景技術】

【0002】

拡張現実感(Augmented Reality)が原子力発電プラント内で使用することができるようになれば、プラントで働く作業員に対して様々な支援を行なうことが可能となる。

【0003】

拡張現実感を使用するためには、作業員の位置と方向をリアルタイム計測するトラッキング技術が必要であるが、GPS(Global Positioning System)・磁気センサ・超音波センサ・慣性センサ等の既存のトラッキング技術は、単独では、原子力発電プラント内部で使用することができない。

【0004】

そこで、発明者らは、原子力発電プラント内部でも使用可能なトラッキング手法として、カメラと遠近両用マーカを用いたトラッキング手法を開発してきた。

【0005】

カメラと遠近両用マーカを用いたトラッキング手法は、作業環境内に複数のマーカを貼り付け、それらをカメラで撮影し、画像処理と幾何計算によりカメラとマーカの間の相対的な位置関係を求める手法である。

## 【0006】

この手法は、屋内でも使用可能、金属や騒音の影響を受けない、時間経過による精度低下や安定性低下がない等の利点があるが、事前に複数のマーカを作業環境内に貼り付け、その3次元位置と方向を計測して記憶しておくことが必要である。

## 【0007】

【特許文献1】再公表W2005-017644号公報

【特許文献2】特開2004-28788号公報

【非特許文献1】L. Quan et al : Linear N-Point Camera Pose Determination, IEEE Trans. on Pattern Analysis and Machine Intelligence, Vol. 21, No. 7, pp. 774-780, 1999.

10

## 【発明の開示】

【発明が解決しようとする課題】

## 【0008】

前述したカメラと遠近両用マーカを用いたトラッキング手法において、貼り付けたマーカの3次元位置と方向を予め計測して記憶させる作業は、手作業で行なってきたが、作業環境が原子力発電プラントであるような場合には、マーカの貼り付け方が複雑になり、非常に手間がかかると共に計測ミスも発生する問題があった。

## 【0009】

従って、本発明の1つの目的は、遠近両用マーカの3次元位置と方向の計測と計測結果の記憶を自動化することにより手間を省くと共に計測ミスの発生を低減しようとするところにある。

20

## 【0010】

本発明の他の目的は、更に、前記マーカの位置と方向を世界座標系の形態で記憶することにある。

【課題を解決するための手段】

## 【0011】

本発明のマーカ自動登録方法及びシステムは、小型コンピュータで制御可能なビデオカメラ、レーザ距離計測器、電動雲台等を使用して作業環境に貼り付けられている遠近両用マーカの3次元位置と方向を自動的に計測し、計測結果を登録(記憶)する構成であり、  
具体的には、

30

環境の基準となる位置及び適宜な位置にマーカを貼り付け、ビデオカメラで撮影可能かつレーザ距離計測器で距離を計測可能な範囲にある総てのマーカの世界座標系で表された3次元位置と方向を全自動で計測して記憶する方法において、

前記マーカとして、四角形の台紙の中心に配置した1つの大円と、台紙の4隅に配置した4つの小円を備え、前記大円は、10個の同型の扇形を円環状に配置し、白色の扇形を0、黒色の扇形を1とすることにより、各マーカのID番号を表現するように構成したものを使用し、

ビデオカメラの焦点距離を設定可能な最も短い値に設定する第1のステップと、

焦点距離を設定可能な最も短い値に設定した前記ビデオカメラの稼動範囲の総ての領域を最低1回は撮影するように等間隔でビデオカメラの撮影方向を回転させ、各撮影方向において、ビデオカメラを用いて撮影してマーカとの間の距離と存在する方向を求めるアルゴリズムを実行することにより、環境に貼り付けられたマーカとの距離と存在する方向を認識して記憶する第2のステップと、

40

ビデオカメラの焦点距離を最も短い値の2倍の値および3倍の値に設定して前記第2のステップを繰り返す第3のステップと、

第1のステップから第3のステップにより認識して記憶した個々のマーカに対してレーザ距離計測器を用いてマーカ上の1点の位置を計測するアルゴリズムを実行することにより、認識した総てのマーカの3次元位置と方向を計測して記憶する第4のステップと、

第4のステップで記憶した総てのマーカの3次元位置と方向に対して、マーカの位置と

50

方向を世界座標系に変換するアルゴリズムを適用して世界座標系で表された3次元位置と方向を求めて記憶する第5のステップを行うことを特徴とするマーカ自動登録方法。

【0013】

また、環境の基準となる位置及び適宜な位置に貼り付けられたマーカのうち、ビデオカメラで撮影可能かつレーザ距離計測器で距離を計測可能な範囲にある総てのマーカの世界座標系で表された3次元位置と方向を全自動で計測して記憶するシステムにおいて、

電動雲台によって向きを変えることができるようにしたビデオカメラと、電動雲台によって向きを変えることができるようにしたレーザ距離計測器と、前記ビデオカメラとレーザ距離計測器電動雲台と接続されてこれらを制御する小型コンピュータとを備え、

前記マーカは、四角形の台紙の中心に配置した1つの大円と、台紙の4隅に配置した4つの小円を備え、前記大円は、10個の同型の扇形を円環状に配置し、白色の扇形を0、黒色の扇形を1とすることにより、各マーカのID番号を表現するように構成し、

前記小型コンピュータは、

前記ビデオカメラの焦点距離を設定可能な最も短い値に設定する第1のステップと、

焦点距離を設定可能な最も短い値に設定した前記ビデオカメラの稼動範囲の総ての領域を最低1回は撮影するように等間隔でビデオカメラの撮影方向を回転させ、各撮影方向において、前記ビデオカメラを用いて撮影してマーカとの間の距離と存在する方向を求めるアルゴリズムを実行することにより、環境に貼り付けられたマーカとの距離と存在する方向を認識して記憶する第2のステップと、

前記ビデオカメラの焦点距離を最も短い値の2倍の値および3倍の値に設定して前記第2のステップを繰り返す第3のステップと、

第1ステップから第3のステップにより認識して記憶した個々のマーカに対して前記レーザ距離計測器を用いてマーカ上の1点の位置を計測するアルゴリズムを実行することにより、認識した総てのマーカの3次元位置と方向を計測して記憶する第4のステップと、

第4のステップで記憶した総てのマーカの3次元位置と方向に対して、マーカの位置と方向を世界座標系に変換するアルゴリズムを適用して世界座標系で表された3次元位置と方向を求めて記憶する第5のステップを行うプログラムを備えたことを特徴とする。

【発明の効果】

【0015】

本発明によれば、遠近両用マーカの3次元位置と方向の計測と計測結果を世界座標系の形態で記憶する処理を自動化することにより手間を省くと共に計測ミスの発生を低減することができる。

【発明を実施するための最良の形態】

【0016】

本発明は、環境の基準となる位置（世界座標系の原点や座標軸上の点）及び適宜な位置に貼り付けられたマーカのうち、ビデオカメラで撮影可能かつレーザ距離計測器で距離を計測可能な範囲にある総てのマーカの世界座標系で表された3次元位置と方向を全自動で計測して記憶するシステムにおいて、

電動雲台によって向きを変えることができるようにしたビデオカメラと、電動雲台によって向きを変えることができるようにしたレーザ距離計測器と、前記ビデオカメラとレーザ距離計測器電動雲台と接続されてこれらを制御する小型コンピュータとを備え、

前記小型コンピュータは、

前記ビデオカメラの焦点距離を設定可能な最も短い値に設定する第1のステップと、

前記ビデオカメラの稼動範囲の総ての領域を最低1回は撮影するように等間隔でビデオカメラの撮影方向を回転させ、各撮影方向において、前記ビデオカメラを用いてマーカとの間の距離と存在する方向を求めるアルゴリズムを実行することにより、環境に貼り付けられたマーカとの距離と存在する方向を認識して記憶する第2のステップと、

前記ビデオカメラの焦点距離を最も短い値の2倍の値および3倍の値に設定して前記第2のステップを繰り返す第3のステップと、

第3のステップまでに認識して記憶した個々のマーカに対して前記レーザ距離計測器を

用いてマーカ上の1点の位置を計測するアルゴリズムを実行することにより、認識した総てのマーカの3次元位置と方向を計測して記憶する第4のステップと、

第4のステップで記憶した総てのマーカの3次元位置と方向に対して、マーカの位置と方向を世界座標系に変換するアルゴリズムを適用して世界座標系で表された3次元位置と方向を求めて記憶する第5のステップを行うプログラムを備え、

前記マーカは、四角形の台紙の中心に配置した1つの大円と、台紙の4隅に配置した4つの小円を備え、前記大円は、10個の同型の扇形を円環状に配置し、白色の扇形を0、黒色の扇形を1とすることにより、各マーカのID番号を表現するように構成したものと

【実施例1】

10

【0017】

図1は、この実施例1において使用する遠近両用マーカの平面図である。この遠近両用マーカ1は、四角形の白色の台紙11の中心に配置した1つの大円12と、台紙11の4隅に配置した4つの小円13<sub>0</sub>~13<sub>3</sub>によって構成し、大円12と小円13<sub>0</sub>~13<sub>3</sub>の中心を特徴点(画像処理により認識可能であり、トラッキングの基準となる点)とする。

【0018】

大円12の中には、10個の同型の扇形12a~12jを円環状に配置し、白色の扇形を0、黒色の扇形を1とすることにより、各マーカ1のID番号を表現するようにする。

【0019】

20

そして、この遠近両用マーカ1は、以下のようにしてトラッキングに使用する。

【0020】

1) 作業環境内に複数の遠近両用マーカ1を予め貼り付けて各遠近両用マーカのID番号と作業環境内での3次元位置を計測して記憶しておく。

【0021】

2) 遠近両用マーカ1が貼り付けられた作業環境を作業者が装着したカメラで撮影する。

【0022】

3) 撮影して得られたカメラ画像データを処理して各遠近両用マーカ1のID番号と特徴点のカメラ撮影画像上での位置を認識する。

30

【0023】

4) カメラ撮影画像上での特徴点の位置と、作業環境内での各遠近両用マーカ1の3次元位置情報を用いて、PnP問題(Perspective N-Point Problem)(非特許文献1参照)を解いてカメラと遠近両用マーカ1とカメラの間の相対的な位置と方向を求める。

【0024】

このようにして行なうトラッキングにおいて、カメラと遠近両用マーカ1の間の相対的な位置と方向を一意に求めるためには、最低4個の特徴点が同時に認識されることが必要である。遠近両用マーカでは、カメラとマーカ1の間の距離が長いときには複数のマーカの大円の中心の特徴点を利用し、距離が短いときには、1つの遠近両用マーカ1の4つの小円の中心の特徴点を利用する。

40

【0025】

したがって、この手法では、作業環境内に貼り付けた遠近両用マーカ1の総ての特徴点の3次元位置(もしくは、マーカ上の1点の3次元位置とマーカ1の方向)を事前に計測して記憶しておくことが必要である。

【0026】

図2は、このような作業環境に貼り付けられた遠近両用マーカ1を自動的に計測して計測結果を登録するマーカ自動登録システムのハードウェア構成を示す斜視図である。

【0027】

2は小型コンピュータで制御可能な電動雲台を内蔵するビデオカメラ、3はレーザ距離計測器、4はレーザ距離計測器3を載置する電動雲台、5は前記ビデオカメラ2とレーザ

50

距離計測器 3 と電動雲台 4 と通信ケーブル 6 を介して接続されてこれらを制御する小型コンピュータ（携帯用パーソナルコンピュータ）、7 は前記ビデオカメラ 2 と電動雲台 4 を取り付けて作業環境内に貼り付けられた遠近両用マーカを見渡せる位置に設置する三脚である。

【 0 0 2 8 】

ビデオカメラ 2 は、小型コンピュータ 5 からの制御信号により、方向、ズーム値、シャッタースピード等が制御される。そして、ビデオカメラ 2 の撮影画像データは、ビデオキャプチャデバイス（図示省略）を用いて小型コンピュータ 5 に入力する。

【 0 0 2 9 】

レーザ距離計測器 3 は、小型コンピュータ 5 からの制御信号により、電動雲台 4 が制御されることによりレーザ光照射方向を目標である遠近両用マーカ 1 に向け、この目標の遠近両用マーカ 1 に向けてレーザ光を照射し、その反射光と照射光の位相差をもとにレーザ距離計測器 3 と目標の遠近両用マーカ 1 との間の距離を計測し、計測結果を小型コンピュータ 5 に伝送する。

10

【 0 0 3 0 】

具体的には、例えば、次のような各機器を使用することにより実現することができる。

【 0 0 3 1 】

ビデオカメラ 2

メーカー・型：Sony E V I - D 3 0

映像出力：N T S C

焦点距離：5 . 4 m m ~ 6 4 . 8 m m

回転範囲：水平 ± 1 0 0 度、垂直 ± 2 5 度

制御端子：R S - 2 3 2 C

20

レーザ距離計測器 3

メーカー・型：Leica Geosystems D I S T O Pro 4a

測定範囲：0 . 3 m ~ 4 0 m

測定精度：標準 ± 1 . 5 m m 最大 ± 2 m m

制御端子：R S - 2 3 2 C

電動雲台 4

メーカー・型：Directed Perception P T U - D 4 6 - 7 0

分解能：0 . 0 1 2 8 5 7 度

最高速度：6 0 度 / 秒

回転範囲：水平 ± 1 5 9 度、垂直 - 3 1 度 + 4 8 度

制御端子：R S - 2 3 2 C

30

ビデオキャプチャ

メーカー・型：I O ・ D A T A 機器 U S B - C A P 2

画像入力：N T S C

解像度：最大 3 5 2 × 2 8 8

画像出力：U S B 1 . 1 ・ R G B 2 4 b i t

取得速度：3 0 f p s

40

小型コンピュータ 5

メーカー・型：A S U S M 5 N

C P U：Pentium M 1 . 4 G H z (Pentiumは登録商標)

メモリ：D D R 3 3 3 7 6 8 M B

O S：Microsoft Windows X P Home Edition (Microsoft Windowsは登録商標)

このようにして構成したマーカ自動登録システムは、作業環境に貼り付けられている遠近両用マーカ 1 の 3 次元位置と方向を自動的に計測し、計測結果を記憶する構成である。

【 0 0 3 2 】

このマーカ自動登録システムを用いて遠近両用マーカを計測して記憶（登録）するため

50

の具体的な方法は、次のようになる。

【 0 0 3 3 】

ステップ S 1

作業環境の基準となる位置（世界座標系の原点や座標軸上の点）及び適宜な位置に遠近両用マーカ 1 を貼り付ける。

【 0 0 3 4 】

ステップ S 2

作業環境に貼り付けた遠近両用マーカ 1 を見渡せる位置にマーカ自動登録システムを設置する。

【 0 0 3 5 】

ステップ S 3

マーカ自動登録システムを用いて作業環境に貼り付けられた総ての遠近両用マーカ 1 の 3 次元位置と方向を計測する。

【 0 0 3 6 】

ステップ S 4

計測結果をファイルに保存し、拡張現実感を使用するシステムに転送する。

【 0 0 3 7 】

前記ステップ S 3 における遠近両用マーカ 1 の計測は、次のようにして自動的に実行する。

【 0 0 3 8 】

ステップ S 3 1

ビデオカメラ 2 を稼動範囲全体で等間隔に回転させながら撮影し、ビデオカメラ 2 に写った遠近両用マーカ 1 の ID 番号、大きさ、方向から、どの遠近両用マーカ 1 がどの位置に貼り付けられているかを画像処理により求める。ここで得られる位置情報には、比較的大きな誤差が含まれる。

【 0 0 3 9 】

ステップ S 3 2

前記ステップ S 3 1 において求めた総ての遠近両用マーカ 1 に対して、より正確な 3 次元位置と方向を、次のようにして計測する。

【 0 0 4 0 】

ステップ S 3 2 1

前記ステップ S 3 1 において得られた遠近両用マーカ 1 の位置情報をもとに、ビデオカメラ 2 の撮影画像の中心に目標の遠近両用マーカ 1 の映像が写るようにビデオカメラ 2 の方向とズームを調整制御する。

【 0 0 4 1 】

ステップ S 3 2 2

前記ステップ S 3 1 において得られた遠近両用マーカ 1 の位置情報をもとに、レーザ距離計測器 3 のレーザ照射方向を目標の遠近両用マーカ 1 の方向に向けるように電動雲台 4 を制御する。

【 0 0 4 2 】

ステップ S 3 2 3

レーザ照射前のビデオカメラ 2 の撮影画像と、レーザ照射後のビデオカメラ 2 の撮影画像を比較することによりレーザ照射位置（レーザ照射スポットの位置）を認識する。

【 0 0 4 3 】

ステップ S 3 2 4

レーザ照射位置が目標の遠近両用マーカ 1 の中心（大円 1 2 の中心と同じ）になるように電動雲台 4 を制御してレーザ距離計測器 3 の向きを微調整する。

【 0 0 4 4 】

ステップ S 3 2 5

目標の遠近両用マーカ 1 とレーザ距離計測器 3 の間の距離を計測する。

10

20

30

40

50

## 【 0 0 4 5 】

## ステップ S 3 2 6

前記ステップ S 3 2 4 で調整したレーザ距離計測器 3 の向きとステップ S 3 2 5 で計測した距離に基づいて、目標の遠近両用マーカ 1 の 3 次元位置を求める。

## 【 0 0 4 6 】

## ステップ S 3 2 7

前述したステップ S 3 2 2 ~ ステップ S 3 2 6 と同様な方法により、目標の遠近両用マーカ 1 の 4 隅の小円近傍の 3 次元位置を求める。

## 【 0 0 4 7 】

## ステップ S 3 3

作業環境の基準となる位置に貼り付けた遠近両用マーカ 1 の 3 次元位置の情報を用いて、世界座標系を基準とした各遠近両用マーカ 1 の 3 次元位置と方向を計算により求める。

## 【 0 0 4 8 】

以上のように、このマーカ自動登録システムは、遠近両用マーカ 1 を貼り付けた作業環境に設置された後は、全自動で各遠近両用マーカ 1 の 3 次元位置と方向を計測するために、計測中に作業員がシステムを操作する必要がなく、多数の遠近両用マーカ 1 の 3 次元位置と方向を計測するのに要する労力を大幅に低減することができる。

## 【 0 0 4 9 】

また、各遠近両用マーカ 1 の計測結果は、最終的には、世界座標系を基準とした値に変換されるために、マーカ自動登録システムを作業環境の何処に置いて使用しても、計測誤差を除いて、常に同じ結果を得ることができる。

## 【 0 0 5 0 】

一方、前記方法では、このマーカ自動登録システムから見えない位置に貼り付けられている遠近両用マーカ 1 は計測することができないため、入り組んだ環境に貼り付けられた遠近両用マーカ 1 の総てを一度に計測することはできない。このような場合には、最低 4 個の遠近両用マーカ 1 を重複して計測することができることを条件にして、マーカ自動登録システムの設置位置を複数回移動させて遠近両用マーカ 1 を計測し、重複して計測した遠近両用マーカの位置情報を用いて、それらの計測結果を統合することが可能である。

## 【 0 0 5 1 】

ここで、前述した遠近両用マーカの自動計測を実現するアルゴリズムを説明する。このアルゴリズムは、小型コンピュータ 5 に組み込んだ制御及び情報処理プログラムを実行することにより実現する。

## 【 0 0 5 2 】

図 3 は、このマーカ自動登録システムで取り扱う座標系を示している。座標系は、総て右手系とする。

## 【 0 0 5 3 】

世界座標系 W は、拡張現実感を利用する作業環境内に固定され、1 番の遠近両用マーカの中心を原点、この 1 番の遠近両用マーカの中心から 2 番の遠近両用マーカの中心へ向う方向を X 軸とし、1 番、2 番、3 番の遠近両用マーカの中心を含む平面を X Y 平面とする。

## 【 0 0 5 4 】

レーザ雲台座標系 A は、レーザ距離計測器 3 を搭載する電動雲台 4 のチルト（上下）方向の回転軸と、パン（左右）方向の回転軸の交点を原点とし、電動雲台 4 が初期化されたときの上下方向を Z 軸、正面方向を X 軸の負の方向とする。レーザ距離計測器座標系 L は、レーザ雲台座標系 A の原点を通る電動雲台 4 の回転台面に垂直な直線と回転台面の交点を原点とし、電動雲台 4 が初期化されたときの上下方向を Z 軸、正面方向を X 軸の負の方向とする。

## 【 0 0 5 5 】

撮影画像（スクリーン）座標系 S は、ビデオカメラ 2 の CCD 素子平面上に設定され、ビデオカメラ 2 の撮影方向を見て左上隅を原点、右向きを X 軸、下向きを Y 軸とする。

10

20

30

40

50



## 【 0 0 5 6 】

カメラ雲台座標系 B は、ビデオカメラ 2 に内蔵の電動雲台のチルト方向の回転軸と、パン方向の回転軸の交点を原点とし、電動雲台が初期化されたときの上方方向を Z 軸、正面方向を X 軸の負の方向とする。

## 【 0 0 5 7 】

カメラ座標系 C は、ビデオカメラ 2 の焦点を原点、画像平面の中央を通り、該画像平面に垂直な方向を X 軸負の方向、撮影画像座標系 S の X 軸に平行な方向を Y 軸とする。

## 【 0 0 5 8 】

ID 番号が  $i$  の遠近両用マーカ 1 のマーカ  $i$  座標系  $M_i$  は、遠近両用マーカ 1 の種類の数だけ設定され、遠近両用マーカ 1 の中心を原点、マーカ面の法線方向を Z 軸とし、遠近両用マーカ 1 の番号を表す扇形  $12a$  ( $\sim 12j$ ) の最上位ビットと最下位ビットの境界を X 軸とする。

10

## 【 0 0 5 9 】

この説明では、スカラー変数を小文字で表し、ベクトルや行列を大文字で表す。また、各変数の基準座標系 (観測座標系) を  ${}^W R_{12}$  のように左上添え字で表す。

## 【 0 0 6 0 】

この実施例では、カメラ雲台座標系 B とカメラ座標系 C の原点は同じであると近似し、レーザ雲台座標系 A とカメラ雲台座標系 B は、各軸が平行になるように予め固定されているものとする。また、レーザ距離計測器 3 をチルト方向に回転させる際、レーザ距離計測器座標系 L の原点は、回転軸から距離  $d_{AL}$  離れた円周上を回転するものとする。

20

## 【 0 0 6 1 】

マーカ認識アルゴリズムについて説明する。このアルゴリズムは、ビデオカメラ 2 に写った遠近両用マーカ 1 の ID 番号、大円  $12$  の特徴点の位置  $(x_1, y_1)$ 、小円  $13_0 \sim 13_3$  の特徴点の位置  $(x_{s_i}, y_{s_i})$  ( $i = 0, 1, 2, 3$ )、大円  $12$  の大きさ  $r_{image}$  (楕円の長軸半径) を認識するアルゴリズムである。このアルゴリズムは、遠近両用マーカ 1 を用いてトラッキングするとき用いるアルゴリズムと同じである。

## 【 0 0 6 2 】

ビデオカメラ 2 から取得したカラー撮影画像データをグレー画像データに変換し、各画素の輝度値を対数変換することにより、高輝度領域と低輝度領域の輝度の変化を強調する。

30

## 【 0 0 6 3 】

その後、 $3 \times 3$  の Sobel フィルタを適用し、予め定めた閾値で 2 値化することにより、画像のエッジ (輝度の変化の大きい部分) を認識する。

## 【 0 0 6 4 】

その後、エッジとして認識された画素間の連結性 (隣り合っているかどうか) を調べ、連結していると認識された個々のエッジ群が、楕円にフィッティングできるかどうかを判定する。楕円にフィッティングできると判定されたエッジ群の中の領域を解析し、その領域が遠近両用マーカ 1 であるかどうかを判定する。遠近両用マーカ 1 である場合は、このマーカの ID 番号と大円の長軸を認識すると共に大円と小円の中心を特徴点として認識する。

40

## 【 0 0 6 5 】

次に、ビデオカメラを用いて遠近両用マーカとの間の距離と存在する方向を求めるアルゴリズムを説明する。このアルゴリズムは、遠近両用マーカ 1 の大円  $12$  の半径  $r_{real_1}$ 、カメラ撮影画像上のマーカの中心座標  $(x_1, y_1)$ 、カメラ撮影画像上の大円の長軸半径  $r_{image}$ 、ビデオカメラ 2 の内部パラメータ (焦点距離  $f$ 、CCD 素子の幅  $w_{CCD}$ 、画像の解像度  $w_{reso}$ 、 $h_{reso}$ ) から、ビデオカメラ 2 に写った遠近両用マーカ 1 とビデオカメラ 2 の間の距離  $d_{CM}$  と、カメラ雲台座標系 B で表された遠近両用マーカ 1 のパン方向  ${}^B M$  とチルト方向  ${}^B M$  を求めるアルゴリズムである。

## 【 0 0 6 6 】

ビデオカメラ 2 の CCD 素子の幅と解像度は、ビデオカメラ 2 とビデオキャプチャデバ

50

イスの仕様書から得ることができ、遠近両用マーカ 1 の大円 1 2 の半径は、事前に遠近両用マーカ 1 を調べておくことにより得ることができる。

【 0 0 6 7 】

ステップ S 4 1

マーカ認識アルゴリズムを用いてカメラ撮影画像上の遠近両用マーカの中心座標 (  $x_1$  ,  $y_1$  ) と大円の長軸半径  $r_{image}$  を求める。

【 0 0 6 8 】

ステップ S 4 2

ビデオカメラ 2 と通信して前記カメラ撮影画像を撮影したときの該ビデオカメラ 2 のパン方向  ${}^B C$ 、チルト方向  ${}^B C$ 、焦点距離  $f$  を得る。 10

【 0 0 6 9 】

ステップ S 4 3

ビデオカメラ 2 と遠近両用マーカ 1 の間の距離  $d_{CM}$  を式 ( 数 1 ) により求める。

【 0 0 7 0 】

【 数 1 】

$$d_{CM} = \frac{r_{real}}{r_{image}} \sqrt{d^2 + \left( \frac{f W_{reso}}{W_{CCD}} \right)^2} \quad \dots\dots (数 1)$$

20

ただし、 $d$  は、カメラ撮影画像上における撮影画像の中心と遠近両用マーカ 1 の中心の間の距離である。

【 0 0 7 1 】

ステップ S 4 4

カメラ雲台座標系  $B$  で表された遠近両用マーカ 1 のパン方向  ${}^B M$ 、チルト方向  ${}^B M$  を式 ( 数 2 )、( 数 3 ) により求める。

【 0 0 7 2 】

【 数 2 】

$${}^B \theta_M = {}^B \theta_C + {}^C \theta_M = {}^B \theta_C + \frac{v_h}{W_{reso}} \left( \frac{W_{reso}}{2} - x_l \right) \quad \dots\dots (数 2)$$

30

【 数 3 】

$${}^B \phi_M = {}^B \phi_C + {}^C \phi_M = {}^B \phi_C + \frac{v_h}{W_{reso}} \left( \frac{h_{reso}}{2} - y_l \right) \quad \dots\dots (数 3)$$

ただし、 $v_h = 2 \arctan ( w_{CCD} / 2 f )$  は、ビデオカメラ 2 の水平方向の画角である。

【 0 0 7 3 】

次に、レーザ距離計測器 3 を用いて遠近両用マーカ 1 上の 1 点の位置を計測するアルゴリズムを説明する。このアルゴリズムは、レーザ距離計測器 3 を搭載する電動雲台 4 のパン方向  $A_L$ 、チルト方向  $A_L$  と、レーザ距離計測器 3 と遠近両用マーカ 1 上の 1 点の間の距離  $d$  から遠近両用マーカ 1 上の 1 点の高精度な 3 次元位置  ${}^A T_{AP}$  を求めるアルゴリズムである。 40

【 0 0 7 4 】

ステップ S 5 1

後述する自動化方法により、レーザの照射位置を計測対象となる遠近両用マーカ 1 上の 1 点に合わせる。

【 0 0 7 5 】

ステップ S 5 2

レーザ距離計測器 3 を制御して該レーザ距離計測器 1 と計測対象の点の間の距離  $d_{lp}$  50

を得る。

【0076】

ステップS53

レーザ距離計測器1を搭載する電動雲台4から、前記距離を得たときのパン方向 ${}^A L$ とチルト方向 ${}^A L$ を得る。

【0077】

ステップS54

計測対象となる遠近両用マーカ1上の1点のレーザ雲台座標系Aで表した3次元位置 ${}^A T_{AP}$ を式(数4)により求める。

【0078】

【数4】

$${}^A T_{AP} = R_z ({}^A \theta_L) R_y ({}^A \phi_L) {}^L D_P \quad \dots\dots (数4)$$

ただし、 ${}^L D_P = (-d_{LP}, 0, d_{AL}) T$ とし、 $R_z ({}^A L)$ および $R_y ({}^A L)$ は、それぞれ、Z軸を中心に ${}^A L$ 、Y軸を中心に ${}^A L$ 回転させる回転行列である。

【0079】

次に、1つの遠近両用マーカの位置と方向を自動的に計測するアルゴリズムについて説明する。このアルゴリズムは、ビデオカメラ2に遠近両用マーカ1が写っている状態から、その遠近両用マーカ1の中心の正確な3次元位置 ${}^A T_{AM}$ と方向 ${}^A R_{AM}$ を自動的に計測するアルゴリズムである。

【0080】

ステップS601

ビデオカメラを用いて遠近両用マーカとの間の距離と存在する方向を求めるアルゴリズムを用いて、カメラ雲台座標系Bで表された遠近両用マーカ1のパン方向 ${}^B M$ 、チルト方向 ${}^B M$ を求める。

【0081】

ステップS602

前記ステップS601で求めた情報に基づいて、遠近両用マーカ1がビデオカメラ2の撮影画像の中心に写るようにビデオカメラ2の撮影方向を調整する。

【0082】

ステップS603

遠近両用マーカ1の大円12のカメラ撮影画像上での長軸半径 $r_{image}$ が、ビデオカメラ2の縦方向の解像度の30%になるように、ビデオカメラ2の焦点距離を調整する。その際、焦点距離を調整する前の長軸半径 $r_{image}$ が、ビデオカメラ2の縦方向の解像度の20%よりも小さい場合には、一旦、長軸半径 $r_{image}$ がビデオカメラ2の解像度の20%になるように焦点距離を調整した後にステップS601とステップS602を繰り返して、遠近両用マーカ1の中心が再度ビデオカメラ2の撮影画像の中心に来るようにビデオカメラ2の撮影方向を調整し、その後、長軸半径 $r_{image}$ がビデオカメラ2の縦方向の解像度の30%となるように焦点距離を調整する。長軸半径 $r_{image}$ がビデオカメラ2の縦方向の解像度のa%になる焦点距離fa%は、式(数5)により求める。

【0083】

【数5】

$$f_{a\%} = \frac{a f h_{reso}}{100 r} \quad \dots\dots (数5)$$

ただし、fは、ステップS601において遠近両用マーカ1を認識したときのビデオカメラ2の焦点距離、rは、そのときの遠近両用マーカ1の大円12のカメラ撮影画像上に

10

20

30

40

50

おける長軸半径とする。

【0084】

ステップS604

ステップS601とステップS602を繰り返し、遠近両用マーカ1の中心がカメラ撮影画像の中心に来るように再度ビデオカメラ2の撮影方向を調整する。

【0085】

ステップS605

ステップS601を実行し、カメラ雲台座標系Bで表された遠近両用マーカ1の中心へのパン方向 ${}^B\theta_M$ 、チルト方向 ${}^B\phi_M$ 、遠近両用マーカ1とビデオカメラ2の間の距離 $d_{CM}$ を求める。このとき、カメラ撮影画像上での遠近両用マーカ1の中心座標 $(x_1, y_1)$ 、4つの小円13の中心座標 $(x_{si}, y_{si})$  ( $i = 0, 1, 2, 3$ )、大円12の短軸半径 $d$ を記憶しておく。

10

【0086】

ステップS606

遠近両用マーカ1の中心の3次元位置ベクトル ${}^A T_{AM}$ を式(数6)により求める。

【0087】

【数6】

$${}^A T_{AM} = {}^A T_{AB} + R_z ({}^B \theta_M) R_y ({}^B \phi_M) {}^C D_M \quad \dots\dots (数6)$$

20

ただし、 ${}^C D_M = (-d_{CM}, 0, 0)^T$ とし、 ${}^A T_{AM}$ は、レーザ雲台座標系Aからカメラ雲台座標系Bへ向かうベクトルであり、事前に計測しておくことが可能である。

【0088】

ステップS607

ステップS606で求めた遠近両用マーカ1の中心の3次元位置ベクトル ${}^A T_{AM} = ({}^A x_M, {}^A y_M, {}^A z_M)$ から、式(数7)および(数8)を用いて、レーザ雲台座標系Aで表された遠近両用マーカ1の中心のパン方向 ${}^A\theta_M$ とチルト方向 ${}^A\phi_M$ を求め、レーザ距離計測器3の向きを遠近両用マーカ1の中心の方向に向ける。

【0089】

【数7】

$${}^A \theta_M = \arctan ({}^A y_M / {}^A x_M) \quad \dots\dots (数7)$$

30

【0090】

【数8】

$${}^A \phi_M = \arctan \left( \frac{{}^A z_M}{\sqrt{{}^A x_M^2 + {}^A y_M^2}} \right) \quad \dots\dots (数8)$$

【0091】

ステップS608

ビデオカメラ2のシャッタースピードを短くすることによってカメラ撮影画像の全体的な明るさを下げる。これは、後の処理において、レーザの照射位置の認識を容易にするためである。

40

【0092】

ステップS609

レーザ距離計測器3によるレーザ照射を止める。

【0093】

ステップS610

カメラ撮影画像データを $I_{off}$ として保存する。

【0094】

50

ステップ S 6 1 1

レーザ距離計測器 3 によるレーザ照射を再開する。

【 0 0 9 5 】

ステップ S 6 1 2

レーザ照射再開後のカメラ撮影画像データを  $I_{on}$  として保存する。

【 0 0 9 6 】

ステップ S 6 1 3

カメラ撮影画像データ  $I_{off}$  と  $I_{on}$  の差分を取り、予め定めた閾値よりも差が大きい画素の面積  $S_{diff}$  を求める。

【 0 0 9 7 】

ステップ S 6 1 4

面積  $S_{diff}$  が予め定めた閾値（レーザ照射スポットの面積）よりも小さい場合はビデオカメラ 2 にレーザの照射スポットが写っていないと判断してステップ S 6 1 5 へ進み、大きい場合はステップ S 6 1 6 へ進む。

【 0 0 9 8 】

ステップ S 6 1 5

レーザ照射方向をステップ S 6 0 7 で求めた遠近両用マーカ 1 の 3 次元位置方向を中心にして螺旋状に等間隔で回転させながら、ステップ S 6 0 9 ~ ステップ S 6 1 4 を繰り返す。ただし、この繰り返し回数が規定の回数を超えた場合は、自動計測が失敗したと判断する。

【 0 0 9 9 】

ステップ S 6 1 6

ステップ S 6 1 3 の差分計算で得た画素の重心座標  $G = (x_G, y_G)$  を求める。

【 0 1 0 0 】

ステップ S 6 1 7

重心座標  $G$  とステップ S 6 0 5 で認識した遠近両用マーカ 1 の中心座標  $(x_1, y_1)$  の差のベクトルを計算し、その長さがステップ S 6 0 5 で認識した遠近両用マーカ 1 の大円 1 2 の短軸半径  $b$  の 1.5 倍よりも小さい場合はステップ S 6 1 8 へ進み、大きい場合はステップ S 6 1 5 へ戻る。

【 0 1 0 1 】

ステップ S 6 1 8

ステップ S 6 1 7 で求めたベクトルが予め定めた閾値よりも小さい場合は、レーザが遠近両用マーカ 1 の中心に照射されていると判断してステップ S 6 2 0 へ進み、大きい場合はステップ S 6 1 9 へ進む。

【 0 1 0 2 】

ステップ S 6 1 9

ステップ S 6 1 7 で求めたベクトルを用いて、レーザの照射位置を遠近両用マーカ 1 の中心に近づけた後、ステップ S 6 0 9 へ戻る。レーザ距離計測器 3 を向けるべき方向は、式 ( 数 9 ) および ( 数 1 0 ) により求める。

【 0 1 0 3 】

【 数 9 】

$${}^A\theta_M = {}^A\theta'_M + (v_h / w_{reso})(x_G - x_l) \quad \dots\dots (数9)$$

【 数 1 0 】

$${}^A\phi_M = {}^A\phi'_M + (v_h / w_{reso})(y_G - y_l) \quad \dots\dots (数10)$$

ただし、 $v_h$  は、ステップ S 6 1 2 の時点でのビデオカメラ 2 の水平方向の画角、 ${}^A\theta'_M$  と  ${}^A\phi'_M$  は、ステップ S 6 1 1 の時点でのレーザ距離計測器 3 の向きである。

10

20

30

40

50

## 【 0 1 0 4 】

ステップ S 6 2 0

レーザ距離計測器を用いて遠近両用マーカ上の 1 点の位置を計測するアルゴリズムを用いて遠近両用マーカ 1 の中心の正確な 3 次元位置  ${}^A T_{AM}$  を求める。

## 【 0 1 0 5 】

ステップ S 6 2 1

遠近両用マーカ 1 の大円 1 2 と小円 1 3 の間の領域（台紙の白色の領域）の中間点の座標  $(x_{lsi}, y_{lsi})$  ( $i = 0, 1, 2, 3$ ) を式（数 1 1）および（数 1 2）により求める。

## 【 0 1 0 6 】

【数 1 1】

$$x_{lsi} = x_i + \frac{d + r_{real} - r_{sreal}}{2d} (x_{si} - x_i) \quad \dots\dots \text{（数 1 1）}$$

【数 1 2】

$$y_{lsi} = y_i + \frac{d + r_{real} - r_{sreal}}{2d} (y_{si} - y_i) \quad \dots\dots \text{（数 1 2）}$$

ただし、 $r_{sreal}$  は小円 1 3 の半径、 $d$  は小円 1 3 の中心と遠近両用マーカ 1 の中心の間の距離である。

## 【 0 1 0 7 】

ステップ S 6 2 2

ステップ S 6 0 9 ~ ステップ S 6 2 0 と同様の処理をステップ S 6 2 1 で求めた 4 点に対して行い、これらの正確な 3 次元位置  ${}^A T_{AMi}$  ( $i = 0, 1, 2, 3$ ) を計測する。

## 【 0 1 0 8 】

ステップ S 6 2 3

遠近両用マーカ 1 の X 軸、Y 軸、Z 軸方向のベクトル  ${}^A X_M$ 、 ${}^A Y_M$ 、 ${}^A Z_M$  を式（数 1 3）~（数 1 5）により求める。

## 【 0 1 0 9 】

【数 1 3】

$${}^A X_M = ({}^A T_{AM0} + {}^A T_{AM1} - {}^A T_{AM3} - {}^A T_{AM2}) \quad \dots\dots \text{（数 1 3）}$$

【数 1 4】

$${}^A Y_M = ({}^A T_{AM0} + {}^A T_{AM3} - {}^A T_{AM1} - {}^A T_{AM2}) \quad \dots\dots \text{（数 1 4）}$$

【数 1 5】

$${}^A Z_M = {}^A X_M \times {}^A Y_M \quad \dots\dots \text{（数 1 5）}$$

ただし、 $i = 0$  となる小円 1 3<sub>0</sub> がマーカ座標系上で  $x > 0$ 、 $y > 0$  の位置にあり、遠近両用マーカ 1 を正面からみて時計回りに小円の番号が付けられているものとする。

## 【 0 1 1 0 】

ステップ S 6 2 4

${}^A X_M$ 、 ${}^A Y_M$ 、 ${}^A Z_M$  の単位ベクトル  ${}^A X_{Mu}$ 、 ${}^A Y_{Mu}$ 、 ${}^A Z_{Mu}$  から式（数 1 6）により遠近両用マーカ 1 の方向  ${}^A R_{AM}$  を求める。

## 【 0 1 1 1 】

10

20

30

40

## 【数 1 6】

$${}^A R_{AM} = \begin{bmatrix} {}^A X_{Mu}^T & {}^A Y_{Mu}^T & {}^A Z_{Mu}^T \end{bmatrix} \quad \dots\dots (\text{数 } 16)$$

## 【0 1 1 2】

この1つの遠近両用マーカの位置と方向を自動的に計測するアルゴリズムにおける前記ステップS 6 1 7において、レーザの照射位置と遠近両用マーカ1の中心位置の距離がカメラ撮影画像上での遠近両用マーカ1の大円12の短軸半径の1.5倍よりも小さいときにのみステップS 6 1 8を実行するようにしたのは、原子力発電プラント内部のような複雑な環境では、レーザが遠近両用マーカ1の背面を通過する場合があります、カメラ撮影画像上に写し出されたレーザと遠近両用マーカ1の位置関係だけでは、レーザの照射方向をどの方向に変更するべきかが判断できないためである。一方、レーザの照射位置と遠近両用マーカ1の中心位置の間の距離が遠近両用マーカ1の大円12のカメラ撮影画像上での短軸半径の1.5倍よりも小さい場合は、レーザは既に遠近両用マーカ1上に照射していると判断することができ、遠近両用マーカ1は必ず平面であるため、ステップS 6 1 9により、必ずレーザの照射位置を遠近両用マーカ1の中心に近い方に調整することができる。ここで、短軸半径の1.5倍としたのは、遠近両用マーカ1の周辺には空白の領域があり、その領域も平面であるからである。

10

## 【0 1 1 3】

また、ステップS 6 2 1以降において、小円13の中心位置を計測するのではなく、小円13と大円12の間の白色の領域を計測するのは、小円13の中心のように黒色の中心は、レーザの反射が弱く、遠近両用マーカ1を斜めから計測した場合に、レーザ距離計測器3では距離を計測することができない場合があるためである。

20

## 【0 1 1 4】

なお、このアルゴリズムを実行する際には、電動雲台を駆動制御した後は、次の処理に移る前に0.5秒～1秒程度の猶予(動作休止)期間を設けることが必要である(この猶予期間は、電動雲台の動作の大きさに依存する)。これは、電動雲台を駆動制御すると、システム全体が振動するため、ビデオカメラ2で取得するカメラ撮影画像データやレーザの照射先(レーザ照射スポット)が静止するのを待つ必要があるためである。

## 【0 1 1 5】

次に、マーカの位置と方向を世界座標系に変換するアルゴリズムについて説明する。

30

## 【0 1 1 6】

このアルゴリズムは、前述した1つの遠近両用マーカ1の位置と方向を自動的に計測するアルゴリズムにより得られたレーザ雲台座標系Aで表された遠近両用マーカ1の3次元位置と方向を、世界座標系Wで表された3次元位置と方向に変換するアルゴリズムである。このアルゴリズムを実行するにあたっては、計測対象となる遠近両用マーカ1に加え、1番と2番の遠近両用マーカが世界座標系Wの原点とX軸上の点にそれぞれ貼り付けられており、3番の遠近両用マーカがXY平面上に貼り付けられているものとする。

## 【0 1 1 7】

ステップS 7 0 1

前述した1つの遠近両用マーカの位置と方向を自動的に計測するアルゴリズムを用いて、変換対象の遠近両用マーカ1の3次元位置 ${}^A T_{AMi}$ と方向 ${}^A R_{AMi}$ および1番から3番の遠近両用マーカの3次元位置 ${}^A T_{AMj}$  ( $j = 1, 2, 3$ )を求める。

40

## 【0 1 1 8】

ステップS 7 0 2

レーザ雲台座標系Aで表された世界座標系WのX, Y, Z軸方向の単位ベクトル ${}^A X_w$ ,  ${}^A Y_w$ ,  ${}^A Z_w$ を式(数17)～(数19)を用いて求める。

## 【0 1 1 9】

【数 17】

$${}^A X_{W_u} = ({}^A T_{AM2} - {}^A T_{AM1}) / \| {}^A T_{AM2} - {}^A T_{AM1} \| \quad \dots\dots (数 17)$$

【0120】

【数 18】

$${}^A Z_{W_u} = {}^A X_{W_u} \times ({}^A T_{AM3} - {}^A T_{AM1}) / \| {}^A T_{AM3} - {}^A T_{AM1} \| \quad \dots\dots (数 18)$$

10

【0121】

【数 19】

$${}^A Y_{W_u} = {}^A Z_{W_u} \times {}^A X_{W_u} \quad \dots\dots (数 19)$$

【0122】

ステップ S 703

世界座標系 W からレーザ雲台座標系 A への回転行列  ${}^W R_{WA}$  を式 (数 20) により求める。

【0123】

【数 20】

$${}^W R_{WA} = \begin{bmatrix} {}^A X_{W_u} \\ {}^A Y_{W_u} \\ {}^A Z_{W_u} \end{bmatrix} \quad \dots\dots (数 20)$$

20

【0124】

ステップ S 704

世界座標系 W からレーザ雲台座標系 A への平行移動ベクトル  ${}^W T_{WA}$  を式 (数 21) に

【0125】

【数 21】

$${}^W T_{WA} = -{}^W R_{WA} {}^A T_{AM1} \quad \dots\dots (数 21)$$

30

【0126】

ステップ S 705

レーザ雲台座標系 A から世界座標系 W への同次変換行列  ${}^A T^{44}_{AW}$  を式 (数 22) に

【0127】

【数 22】

$${}^A T^{44}_{AW} = \begin{bmatrix} {}^W R_{WA} & {}^W T_{WA} \\ 000 & 1 \end{bmatrix} \quad \dots\dots (数 22)$$

40

【0128】

ステップ S 706

式 (数 23) により、レーザ雲台座標系 A で表された遠近両用マーカの 3 次元位置  ${}^A T_{AMi}$  を世界座標系 W で表された 3 次元位置  ${}^W T_{WMi}$  に変換する。

50



【 0 1 2 9 】

【 数 2 3 】

$$\begin{bmatrix} {}^W T_{WMi} \\ 1 \end{bmatrix} = {}^A T_{AW}^{44} \begin{bmatrix} {}^A T_{AMi} \\ 1 \end{bmatrix} \quad \dots\dots (数 2 3)$$

【 0 1 3 0 】

ステップ S 7 0 7

前述した1つの遠近両用マーカの位置と方向を自動的に計測するアルゴリズムにおけるステップ S 6 2 3 の処理の前に、 ${}^A T_{AMi}$  ( $i = 0, 1, 2, 3$ ) を式 (数 2 3) で変換することにより、世界座標系 W で表された遠近両用マーカ 1 の方向  ${}^W R_{WMi}$  を得る。

10

【 0 1 3 1 】

次に、総ての遠近両用マーカの位置と方向を自動的に計測して登録するアルゴリズムを説明する。このアルゴリズムは、ビデオカメラ 2 で撮影可能かつレーザ距離計測器 3 で距離を計測可能な範囲にある総ての遠近両用マーカ 1 の世界座標系 W で表された 3 次元位置と方向を全自動で計測して記憶 (登録) するアルゴリズムである。

【 0 1 3 2 】

ステップ S 8 0 1

ビデオカメラ 2 の焦点距離を設定可能な最も短い値に設定する (ビデオカメラ 2 を最も広角にする)。

20

【 0 1 3 3 】

ステップ S 8 0 2

ビデオカメラ 2 の稼動範囲の総ての領域を最低 1 回は撮影するように等間隔でビデオカメラ 2 の撮影方向を回転させ、各撮影方向において、前述したビデオカメラを用いて遠近両用マーカとの間の距離と存在する方向を求めるアルゴリズムを実行することにより、作業環境に貼り付けられた遠近両用マーカ 1 との距離と存在する方向を認識して記憶する。

【 0 1 3 4 】

ステップ S 8 0 3

ビデオカメラ 2 の焦点距離を最も短い値の 2 倍の値および 3 倍の値に設定してステップ S 8 0 2 を繰り返す。

30

【 0 1 3 5 】

ステップ S 8 0 4

ステップ S 8 0 3 までに認識して記憶した個々の遠近両用マーカ 1 に対して前述したレーザ距離計測器を用いて遠近両用マーカ上の 1 点の位置を計測するアルゴリズムを実行することにより、認識した総ての遠近両用マーカ 1 の 3 次元位置と方向を計測して記憶する。

【 0 1 3 6 】

ステップ S 8 0 5

ステップ S 8 0 4 で記憶した総ての遠近両用マーカ 1 の 3 次元位置と方向に対して、マーカの位置と方向を世界座標系に変換するアルゴリズムを適用して世界座標系 W で表された 3 次元位置と方向を求めて記憶 (登録) する。

40

【 0 1 3 7 】

以上の方法で計測した遠近両用マーカ 1 の 3 次元位置と方向は、以下の方法で利用することができる。

【 0 1 3 8 】

作業環境である原子力発電プラント内で使用するときには、壁や作業対象機器の周辺に貼り付けられた複数の遠近両用マーカ 1 について、事前に、前述したようにしてその 3 次元位置と方向を計測して得た世界座標系 W で表された 3 次元位置と方向の情報として拡張現実感に取得 (記憶) しておく。

【 0 1 3 9 】

50

拡張現実感を使用するときの機器としてHMD(Head Mounted Display)を用いる場合には、ビデオカメラをMHDの前面か作業員のヘルメットの前部に取り付け、PDA(Personal Digital Assistant)等の小型ディスプレイを用いる場合には、ビデオカメラを機器画面の裏側に取り付ける。

【0140】

遠近両用マーカ1と作業員(ビデオカメラ)の間の距離が長いときは、ビデオカメラには多数の遠近両用マーカ1が小さく写ることになり、遠近両用マーカの大円の中心は認識することができるが、4つの小円の中心は認識することが困難である。従って、1つの遠近両用マーカ1からは1つの特徴点しか得ることができないが、複数の遠近両用マーカの特徴点を同時に得ることができるので、遠近両用マーカ1についての記憶情報を参照して

10

【0141】

遠近両用マーカ1と作業員(ビデオカメラ)の間の距離が短いときは、ビデオカメラには少数の遠近両用マーカ1が大きく写ることになり、小円の特徴も認識することができることから、遠近両用マーカ1上の総ての特徴点を認識することが可能となり、1つの遠近両用マーカ1が写るだけでトラッキングするのに必要な数の特徴点の認識が可能になる。

【0142】

このように、この実施例で使用する遠近両用マーカ1は、1つの遠近両用マーカ1が近距離と遠距離の両方で効果的にトラッキングに利用することが可能となり、作業環境に貼り付ける遠近両用マーカ1の数を減らすことができる利点がある。

20

【0143】

この実施例で例示したマーカ自動登録システムによる計測精度と計測に要する時間に関する実験結果について説明する。

【0144】

この実験は、大型プリンタを用いて図4に示すように9個の遠近両用マーカ1を印刷した紙を壁に貼り付け、前記9個の遠近両用マーカ1の3次元位置と方向を自動登録システムを用いて自動計測して登録する処理における登録結果とそれに要した時間を記録するように行った。

【0145】

遠近両用マーカ1は、大円12の半径を50mm、小円13<sub>0</sub>~13<sub>3</sub>の半径を6mm、大円12の中心と小円13<sub>0</sub>~13<sub>3</sub>の中心の間の距離を71mmとした。マーカ自動登録システムの設置位置は、図5に示すように、中央の1番の遠近両用マーカ1から2mの位置と4mの位置、中央の1番の遠近両用マーカ1の法線方向から0°の位置、20°の位置、40°の位置に変化させ(計6箇所)、総ての位置で5回繰り返して総ての遠近両用マーカ1を自動計測して登録した。

30

【0146】

その結果、総ての場合において、失敗することなく、遠近両用マーカ1を計測することができた。

【0147】

計測に要した時間は、可動範囲全体でビデオカメラ2を回転させて遠近両用マーカ1の位置と方向を認識して記憶する処理(ステップS801~ステップS803の処理)で平均195秒、レーザ距離計測器3を用いて遠近両用マーカ1の正確な3次元位置と方向を認識して記憶する処理(ステップS804~ステップS805)では遠近両用マーカ1の1個当たり平均50秒であった。

40

【0148】

電動雲台を駆動制御した後に振動が収まるまでの猶予期間は、ビデオカメラ2とレーザ距離計測器3を異なる三脚を用いて設置したり、防振部材を用いてシステムの振動を低減する対策を行えば、猶予期間を短縮して所要時間を短縮することが可能となる。

【0149】

表1は、遠近両用マーカ1の計測結果と真値(大型プリンタにより遠近両用マーカ1を

50

印刷する際に設定した遠近両用マーカ 1 の位置と方向から計算)を比較した結果(座標の規準となる 1 番 ~ 3 番の遠近両用マーカを除く)を示している。

【 0 1 5 0 】

マーカ自動登録システムを設置した総ての位置での計測結果の二乗平均誤差(Root Mean Square Error)を求めた結果、位置に関して X, Y, Z の各軸方向に 2 mm 程度の誤差があり、方向に関しては、各軸を中心に 1 ° 未満の回転誤差があることが分かった(総ての軸を纏めた場合、位置は 3 . 4 mm、方向は 1 . 1 ° の誤差)。

【 0 1 5 1 】

【表 1】

表 1

システム		位置のRMSE(mm)				方向のRMSE(°)			
距離	角度	X軸	Y軸	Z軸	3軸	X軸	Y軸	Z軸	3軸
2 m	0°	1.7	2.0	2.4	3.6	0.85	0.89	0.45	1.28
2 m	20°	2.1	1.9	2.0	3.4	0.64	0.78	0.47	0.94
2 m	40°	3.2	1.8	2.5	4.5	0.59	0.79	0.60	1.03
4 m	0°	1.4	1.6	2.4	3.2	0.89	0.83	0.49	1.36
4 m	20°	1.6	1.2	1.6	2.6	0.64	0.74	0.44	0.90
4 m	40°	1.4	1.5	1.7	2.7	0.64	0.85	0.45	1.08
全位置		2.0	1.7	2.1	3.4	0.72	0.81	0.49	1.12

10

20

【 0 1 5 2 】

図 6 は、遠近両用マーカ 1 の計測結果(登録情報)を用いて実際にトラッキングを行った際の精度を示している。

【 0 1 5 3 】

解像度 X V G A、水平画角約 33 ° のトラッキング用ビデオカメラを 1 番の遠近両用マーカ 1 の正面約 0 . 5 m の位置から約 0 . 5 m 間隔で約 5 . 0 m 移動させ、各位置で 1 0 回ずつトラッキングを行う処理を、前述した方法で登録した 3 0 セットのマーカ配置情報の総てを用いて繰り返し行い、それらの総ての結果に対する平均二乗誤差を求めた。その結果、トラッキング範囲全体で平均二乗誤差が 2 0 0 mm 未満であり、危険箇所表示機能等を備えた拡張現実感環境を実現することが可能であることが分かった。

30

【図面の簡単な説明】

【 0 1 5 4 】

- 【図 1】本発明の実施例 1 において使用する遠近両用マーカの平面図である。
- 【図 2】作業環境に貼り付けられた遠近両用マーカを自動的に計測して計測結果を登録する本発明の実施例 1 におけるマーカ自動登録システムのハードウェア構成を示す斜視図である。
- 【図 3】このマーカ自動登録システムで取り扱う座標系を示すものである。
- 【図 4】本発明の実施例 1 において 9 個の遠近両用マーカを印刷した紙を壁に貼り付けた状態を示す正面図である。
- 【図 5】本発明の実施例 1 において壁に貼り付けた遠近両用マーカとシステムの設置位置関係を示す平面図である。
- 【図 6】本発明の実施例 1 により記憶した遠近両用マーカの計測結果(登録情報)を用いて実際にトラッキングを行った際の精度を示す特性図である。

40

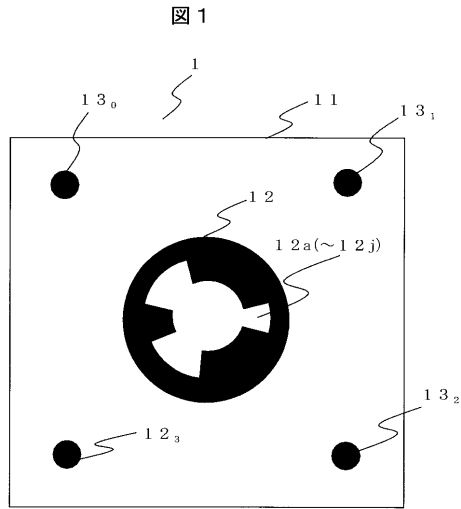
【符号の説明】

【 0 1 5 5 】

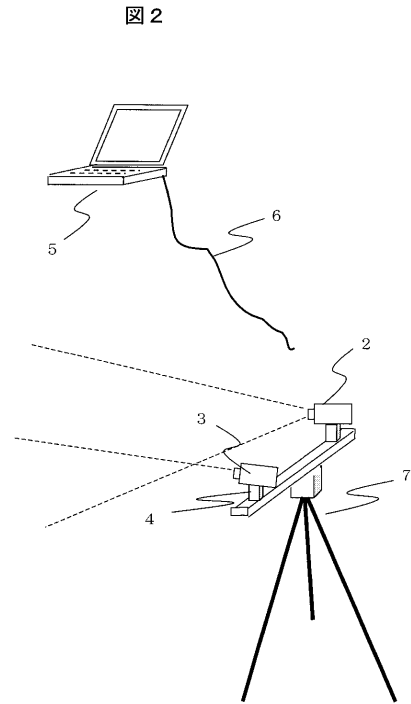
1 ... 遠近両用マーカ、 1 1 ... 台紙、 1 2 ... 大円、 1 3 0 ~ 1 3 3 ... 小円、 2 ... ビデオカメラ、 3 ... レーザ距離計測器、 4 ... 電動雲台、 5 ... 小型コンピュータ、 7 ... 三脚。

50

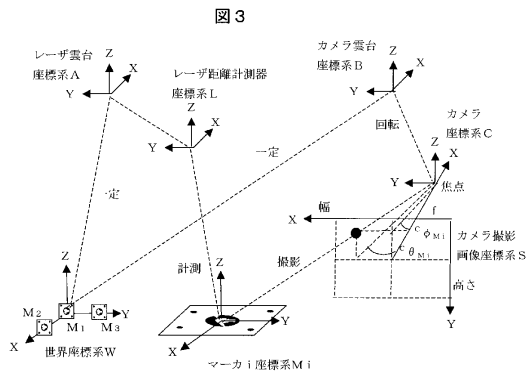
【図1】



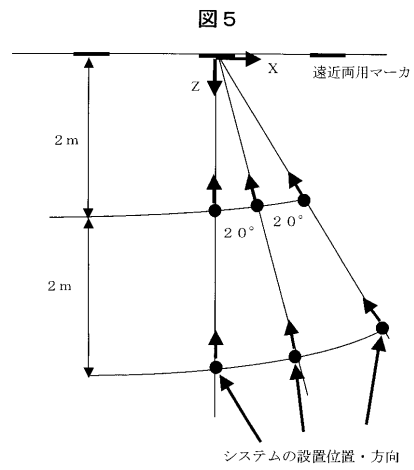
【図2】



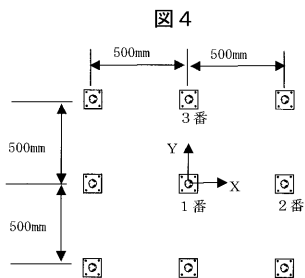
【図3】



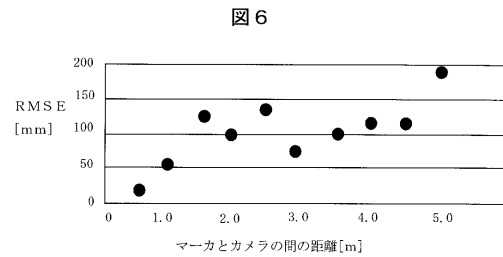
【図5】



【図4】



【図6】



## フロントページの続き

- (72)発明者 楊 首峰  
京都府宇治市五ヶ庄 国立大学法人京都大学内
- (72)発明者 顔 偉達  
京都府宇治市五ヶ庄 国立大学法人京都大学内
- (72)発明者 泉 正憲  
福井県敦賀市明神町3番地 独立行政法人日本原子力研究開発  
機構 敦賀本部原子炉廃止措置研究開発センター内

審査官 櫻井 健太

- (56)参考文献 特開2003-130644(JP,A)  
特開2001-296124(JP,A)  
特開2003-097922(JP,A)  
特開2002-071313(JP,A)  
Leonid Naimak, Eric Foxlin, Circular Data Matrix Fiducial System and Robust Image Processing for a Wearable Vision-Inertial Self-Tracker, Proc. IEEE and ACM Int. Symp. Mixed and Augmented Reality (ISMAR2002), 米国, IEEE, 2002年, 22頁 - 36頁

## (58)調査した分野(Int.Cl., DB名)

G01C 1/00 - 1/14  
G01C 5/00 - 15/14  
G01B 11/00 - 11/30