

(19) 日本国特許庁(JP)

(12) 公開特許公報(A)

(11) 特許出願公開番号

特開2006-222920

(P2006-222920A)

(43) 公開日 平成18年8月24日(2006.8.24)

(51) Int. Cl.	F I	テーマコード (参考)
HO4N 5/225 (2006.01)	HO4N 5/225 Z	2H059
GO3B 15/00 (2006.01)	GO3B 15/00 S	5B047
GO3B 37/00 (2006.01)	GO3B 15/00 W	5C122
GO6T 1/00 (2006.01)	GO3B 37/00 A	
HO4N 5/232 (2006.01)	GO6T 1/00 420C	

審査請求 未請求 請求項の数 11 O L (全 39 頁) 最終頁に続く

(21) 出願番号 特願2005-36989 (P2005-36989)
 (22) 出願日 平成17年2月14日 (2005.2.14)

(71) 出願人 504165591
 国立大学法人岩手大学
 岩手県盛岡市上田三丁目18番8号
 (74) 代理人 100088155
 弁理士 長谷川 芳樹
 (74) 代理人 100092657
 弁理士 寺崎 史朗
 (74) 代理人 100124291
 弁理士 石田 悟
 (72) 発明者 李 仕剛
 岩手県盛岡市上田三丁目18番8号 国立
 大学法人岩手大学内
 Fターム(参考) 2H059 BA11
 5B047 BB04 BC05 BC09 BC21 BC23
 CB23 DC09
 最終頁に続く

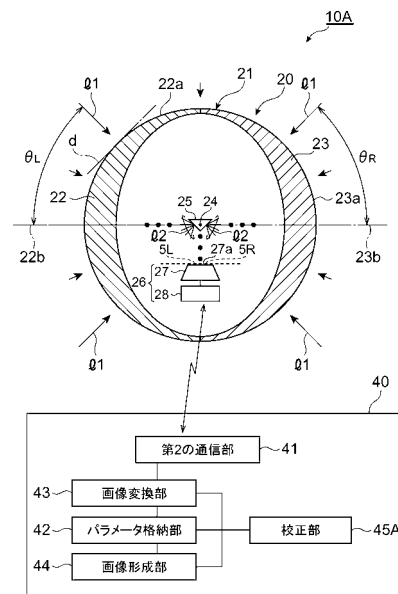
(54) 【発明の名称】 撮像装置及び撮像系パラメータの校正方法

(57) 【要約】

【課題】 同一時刻における全天周の画像情報を取得可能な撮像装置、及び、その撮像装置に好適に適用できる撮像系パラメータの校正方法を提供する。

【解決手段】 撮像装置10Aは、外面が入射面としての第1及び第2の湾曲面22a、23aとなっている第1及び第2の結像手段22、23が結合されることによって構成される中空の像形成部21と、像形成部の中心部24に配置されると共に第1及び第2の結像手段に入射した入射光線の光路を変更して同じ側に伝搬させる光路変更素子25と、第1及び第2の結像手段を通り光路変更素子によって光路が変更された入射光線に基づいて形成される第1及び第2の被写体像31、32を共に撮像する撮像手段26とを備える。そして、撮像装置が有する第1及び第2の結像手段は、第1及び第2の湾曲面に入射する入射光線を像形成部の中心部に集光する。

【選択図】 図3



【特許請求の範囲】

【請求項 1】

外面が入射面としての第 1 の湾曲面となっている第 1 の結像手段と外面が入射面としての第 2 の湾曲面となっている第 2 の結像手段とが結合されることによって構成される中空の像形成部と、

前記像形成部の中心部に配置される光路変更素子と、

前記第 1 の結像手段によって結像される第 1 の被写体像と前記第 2 の結像手段によって結像される第 2 の被写体像とを共に撮像する撮像手段と、
を備え、

前記第 1 及び第 2 の結像手段は、前記第 1 及び第 2 の湾曲面に入射する入射光線を前記像形成部の前記中心部に集光し、 10

前記光路変更素子は、前記第 1 及び第 2 の結像手段の各々に入射した入射光線の光路を変更して前記撮像手段に入射させ、

前記撮像手段は、前記第 1 の結像手段を通り前記光路変更素子によって光路が変更された入射光線に基づいて形成される前記第 1 の被写体像と前記第 2 の結像手段を通り前記光路変更素子によって光路が変更された入射光線に基づいて形成される前記第 2 の被写体像とを共に撮像することを特徴とする撮像装置。

【請求項 2】

前記第 1 及び第 2 の被写体像から、前記第 1 及び第 2 の被写体像に含まれる画像情報を球体の表面に有する球面画像を形成する画像形成手段を更に備え、 20

前記画像形成手段は、

前記第 1 及び第 2 の結像手段が有する焦点距離を f_I (I は、第 1 の結像手段に対して L 、第 2 の結像手段に対して R 、以下同様とする)、前記第 1 及び第 2 の結像手段の光軸と前記第 1 及び第 2 の結像手段の像面との交点に対応する画像中心 O_I を原点として有すると共に前記像面に対応する $X_I Y_I$ 平面を有する 3 次元座標系を第 1 及び第 2 の画像座標系としたとき、前記第 1 及び第 2 の被写体像に含まれる画像情報を、前記第 1 及び第 2 の画像座標系の前記画像中心 O_I を中心とする半球体の表面に有する第 1 及び第 2 の半球面画像に変換する画像変換部と、

前記画像変換部において得られた第 1 及び第 2 の半球面画像を、前記第 1 の画像座標系と前記第 2 の画像座標系の相対姿勢情報に基づいて結合することによって前記球面画像を形成する画像形成部とを備えることを特徴とする請求項 1 に記載の撮像装置。 30

【請求項 3】

前記画像形成手段は、

前記相対姿勢情報、前記画像中心 O_I 及び前記焦点距離 f_I を校正する校正部を更に備え、

前記画像変換部は、前記校正部によって校正された画像中心 O_I 及び焦点距離 f_I に基づいて前記第 1 及び第 2 の被写体像を第 1 及び第 2 の半球面画像に変換し、

前記画像形成部は、前記画像変換部で得られた前記第 1 及び第 2 の半球面画像を、前記校正部で校正された相対姿勢情報に基づいて結合して前記球面画像を形成することを特徴とする請求項 2 に記載の撮像装置。 40

【請求項 4】

前記第 1 及び第 2 の結像手段のそれぞれの中心線と前記第 1 及び第 2 の結像手段に入射する入射光線とのなす角度を θ_I とし、前記第 1 及び第 2 の結像手段に入射した前記入射光線と前記像面との交点に対応する前記 $X_I Y_I$ 平面上の点の前記画像中心 O_I からの距離を r_I とし、前記焦点距離 f_I に依存しており前記距離 r_I の歪みパラメータを k_I としたとき、前記距離 r_I が、

【数 1】

$$r_I(\theta_I) = \sum_{i=1}^{\infty} k_{I,2i-1}(f_I) \theta_I^{2i-1} \cdot \cdot \cdot \quad (1)$$

と表されており、前記校正部は、式(1)のうちの $2N-1$ (N は、2以上の整数)次までの項を選択した、

【数 2】

$$r_I(\theta_I) = \sum_{i=1}^N k_{I,2i-1}(f_I) \theta_I^{2i-1} \cdot \cdot \cdot \quad (2)$$

10

を利用して、前記画像中心 O_I 、前記焦点距離 f_I 及び前記相対姿勢情報のうちの少なくとも一つを校正することを特徴とする請求項3に記載の撮像装置。

【請求項 5】

前記撮像手段は前記像形成部の内側に配置されており、前記画像形成手段は前記像形成部の外側に配置されており、

前記撮像手段は、前記第1及び第2の被写体像の画像情報を前記画像形成手段に送信する第1の通信部を有し、

20

前記画像形成手段は、前記第1の通信部によって送信された前記第1及び第2の被写体像の画像情報を受信する第2の通信部を有することを特徴とする請求項2~4の何れか一項に記載の撮像装置。

【請求項 6】

前記撮像手段及び前記画像形成手段は前記像形成部の外側に配置されていることを特徴とする請求項2~4の何れか一項に記載の撮像装置。

【請求項 7】

入射面としての第1の湾曲面を有すると共に 180 度以上の画角を有する第1の結像手段と、入射面としての第2の湾曲面を有すると共に 180 度以上の画角を有する第2の結像手段と、前記第1の結像手段と前記第2の結像手段との間に配置されると共に前記第1及び第2の結像手段に入射した入射光線の光路を変更して同じ側に伝搬させる光路変更素子と、前記第1の結像手段を通り前記光路変更素子によって光路が変更された入射光線に基づいて形成される第1の被写体像と前記第2の結像手段を通り前記光路変更素子によって光路が変更された入射光線に基づいて形成される第2の被写体像とを共に撮像する撮像手段とを備え、

30

前記第1及び第2の結像手段が有する焦点距離を f_I (I は、第1の結像手段に対して L 、第2の結像手段に対して R 、以下同様とする)、前記第1及び第2の結像手段の光軸と前記第1及び第2の結像手段の像面との交点に対応する画像中心 O_I を原点として有すると共に前記像面に対応する $X_I Y_I$ 平面を有する3次元座標系を第1及び第2の画像座標系とし、前記第1及び第2の結像手段のそれぞれの中心線と前記第1及び第2の結像手段に入射する入射光線とのなす角度を θ_I とし、前記第1及び第2の結像手段に入射した前記入射光線と前記像面との交点に対応する前記 $X_I Y_I$ 平面上の点の前記画像中心 O_I からの距離を r_I とし、前記焦点距離 f_I に依存しており前記距離 r_I の歪みパラメータを k_I としたとき、前記距離 r_I が、

40

【数 3】

$$r_I(\theta_I) = \sum_{i=1}^{\infty} k_{I,2i-1}(f_I) \theta_I^{2i-1} \cdot \cdot \cdot \quad (3)$$

で表される撮像装置に対して適用され、

50

前記画像中心 O_I 、前記焦点距離 f_I 、及び、前記第 1 の画像座標系と前記第 2 の画像座標系との相対姿勢情報を校正するパラメータ校正工程を備え、

前記パラメータ校正工程は、前記画像中心 O_I 、前記焦点距離 f_I 、及び、前記相対姿勢情報のうちの少なくとも 1 つを、式 (3) のうち $2N - 1$ (N は、2 以上の整数) 次の項までを選択した、

【数 4】

$$r_I(\theta_I) = \sum_{i=1}^N k_{I,2i-1}(f_I)\theta_I^{2i-1} \cdots (4)$$

10

を利用して校正することを特徴とする撮像系パラメータの校正方法。

【請求項 8】

前記パラメータ校正工程は、

前記第 1 及び第 2 の被写体像を取得する像取得工程と、

3 つ以上の前記第 1 及び第 2 の被写体像にそれぞれ含まれる一対の消失点に基づいて前記画像中心 O_I を校正する画像中心校正工程と、

N 個以上の前記第 1 及び第 2 の被写体像に含まれる消失点の前記第 1 及び第 2 の画像座標系における位置座標、及び、式 (4) を利用して前記焦点距離 f_I を校正する焦点距離校正工程と、

3 つ以上の前記第 1 及び第 2 の被写体像に含まれており実空間での水平線に略平行な直線群の消失点及び前記直線群に略直交する直線群の消失点に基づいて、前記第 1 及び第 2 の画像座標系の相対姿勢情報を取得する姿勢情報取得工程とを備えることを特徴とする請求項 7 に記載の撮像系パラメータの校正方法。

20

【請求項 9】

前記パラメータ校正工程は、

前記第 1 及び第 2 の被写体像を取得する像取得工程と、

前記像取得工程で取得された前記第 1 及び第 2 の被写体像の画像情報を、前記第 1 及び第 2 の画像座標系での前記画像中心 O_I を中心とした半球体の表面に有する第 1 及び第 2 の半球面画像に変換する第 1 の画像変換工程と、

式 (4) の逆関数を $(r_I; k_{I,1} \sim k_{I,2i-1})$ (ただし、 i は、 N までの 2 以上の整数) として、 r_I を、

30

【数 5】

$$\theta_I = \eta(r_I; k_{I,1} \sim k_{I,2i-1}) \cdots (5)$$

とし、前記第 1 及び第 2 の結像手段の校正後の画像中心の位置座標を $(x_{I,c}, y_{I,c})$ 、実空間での直線パターンの投影像内の点の前記 $X_I Y_I$ 平面における位置座標を (x_I, y_I) とし、前記距離 r_I を、

【数 6】

$$r_I = \sqrt{(x_I - x_{I,c})^2 + (y_I - y_{I,c})^2} \cdots (6)$$

40

とし、 r_I を、

【数 7】

$$\phi_I = \arctan(y_I - y_{I,c}, x_I - x_{I,c}) \cdots (7)$$

とし、式 (5) ~ 式 (7) に基づいて表されると共に前記第 1 及び第 2 の半球面画像が有する前記直線パターンの投影像を含む平面の法線ベクトル n_I が、前記第 1 及び第 2 の画

50

像座標系が有する Z_I 軸となす角度を θ_{In} とし、前記法線ベクトル n_I が X_I 軸となす角度を ϕ_{In} とし、前記平面の方程式に基づいた評価関数 $\xi 1_I$ を

【数 8】

$$\xi 1_I = \sum_{l=1}^F \sum_{p=1}^{R_l} (\sin \theta_{Inl} \cos \phi_{Inl} \sin \theta_{Ipl} \cos \phi_{Ipl} + \sin \theta_{Inl} \sin \phi_{Inl} \sin \theta_{Ipl} \sin \phi_{Ipl} + \cos \theta_{Inl} \cos \theta_{Ipl})^2 \cdots (8)$$

としたとき、式(8)を最小にするように $x_{I,c}$ 、 $y_{I,c}$ 、 $k_{I,1} \sim k_{I,2i-1}$ を決めることによって内部パラメータとしての前記画像中心 O_I 及び前記焦点距離 f_I を校正する内部パラメータ校正工程と、

前記撮像手段によって同時に取得された一对の第1及び第2の被写体像の画像情報を、前記内部パラメータ校正工程で校正された前記画像中心 O_I を中心とする半球体の表面に有する第1及び第2の半球面画像に変換する第2の画像変換工程と、

前記第2の画像変換工程で得られた第1の半球面画像が有する実空間での直線パターンの投影像を含む平面の法線ベクトルを n_L とし、前記第2の画像変換工程で得られた第2の半球面画像が有する実空間での直線パターンの投影像を含む平面の法線ベクトルを n_R とし、校正された前記画像中心 O_I を原点とする前記第2の画像座標系から前記第1の画像座標系への変換行列を $R_{L,R}$ とし、評価関数 $\xi 2$ を、

【数 9】

$$\xi 2 = \sum_{i=1}^n (n_{L,i} - R_{LR} n_{R,i})^2 \cdots (9)$$

としたとき、式(9)を最小にする変換行列 $R_{L,R}$ を決定することによって前記相対姿勢情報を校正する相対姿勢情報校正工程とを備えることを特徴とする請求項7に記載のパラメータの校正方法。

【請求項 10】

前記パラメータ校正工程は、

前記第1及び第2の被写体像を取得する像取得工程と、

前記第1及び第2の被写体像の画像情報を、前記第1及び第2の画像座標系での前記画像中心 O_I を中心とした半球体の表面に有する第1及び第2の半球面画像に変換する画像変換工程と、

式(4)の逆関数を $(r_I; k_{I,1} \sim k_{I,2i-1})$ (ただし、 i は、 N までの2以上の整数)として、 θ_I を、

【数 10】

$$\theta_I = \eta(r_I; k_{I,1} \sim k_{I,2i-1}) \cdots (10)$$

とし、前記第1の結像手段の校正後の画像中心の位置座標を $(x_{I,c}, y_{I,c})$ とし、前記第1及び第2の被写体像に含まれる点の前記 X_I - Y_I 平面での位置座標を (x_I, y_I) とし、前記距離 r_I を、

【数 11】

$$r_I = \sqrt{(x_I - x_{I,c})^2 + (y_I - y_{I,c})^2} \cdots (11)$$

とし、 η を、

10

20

30

40

50

【数 1 2】

$$\phi_I = \arctan(y_I - y_{I,c}, x_I - x_{I,c}) \cdots (12)$$

としたときに、前記第 1 及び第 2 の半球面画像のうち前記位置座標 (x_I, y_I) に対応する点の位置ベクトル m_I を、

【数 1 3】

$$m_I = [\sin \theta_I \cos \phi_I \quad \sin \theta_I \sin \phi_I \quad \cos \theta_I]^T \cdots (13)$$

10

とし、前記第 2 の画像座標系から前記第 1 の画像座標系への変換行列を R_{L_R} としたとき、前記第 2 の画像座標系で表される位置ベクトル m_R を、前記変換行列 R_{L_R} によって前記第 1 の画像座標系で表すことによって前記第 1 の画像座標系で表される球面画像を形成する画像形成工程と、

前記画像形成工程において形成された前記球面画像上の点 m の位置ベクトルを、

【数 1 4】

$$m = [u \quad v \quad s]^T \cdots (14)$$

20

としたとき、点 m に対応する実空間の点を M_c とし、前記第 1 の画像座標系に回転行列 R

【数 1 5】

$$R = [j_1 \quad j_2 \quad j_3] \cdots (15)$$

及び、並進行列 T

【数 1 6】

$$T = [t_x \quad t_y \quad t_z] \cdots (16)$$

30

を利用して変換できる 3 次元座標系としての世界座標系における前記点 M_c の位置ベクトルを、

【数 1 7】

$$M_w = [X_w \quad Y_w \quad Z_w] \cdots (17)$$

として、 N_w を

40

【数 1 8】

$$N_w = [X_w \quad Y_w \quad Z_w \quad 1] \cdots (18)$$

とし、評価関数 C を、

【数 19】

$$C = \sum_{i=1}^n \left(s_i j_1^T N_{wi} - u_i j_3^T N_{wi} + s_i t_x - u_i t_z \right)^2 + \sum_{i=1}^n \left(s_i j_2^T N_{wi} - v_i j_3^T N_{wi} + s_i t_y - v_i t_z \right)^2 \cdots (19)$$

としたとき、式(19)を最小にする $x_{I,c}$ 、 $y_{I,c}$ 、 $k_{I,1} \sim k_{I,2i-1}$ (ただし、 i は N までの 2 以上の整数) 及び変換行列 $R_{L,R}$ を決定することによって、前記画像中心 O_I 、前記焦点距離 f_I 及び前記相対姿勢情報を校正する校正工程とを備えることを特徴とする請求項 7 に記載の撮像系パラメータの校正方法。 10

【請求項 11】

入射面としての第 1 の湾曲面を有すると共に 180 度以上の画角を有する第 1 の結像手段と、入射面としての第 2 の湾曲面を有すると共に 180 度以上の画角を有する第 2 の結像手段と、前記第 1 の結像手段と前記第 2 の結像手段との間に配置されると共に前記第 1 及び第 2 の結像手段に入射した入射光線の光路を変更して同じ側に伝搬させる光路変更素子と、前記第 1 の結像手段を通り前記光路変更素子によって光路が変更された入射光線に基づいて形成される第 1 の被写体像と前記第 2 の結像手段を通り前記光路変更素子によって光路が変更された入射光線に基づいて形成される第 2 の被写体像とを共に撮像する撮像手段とを備える撮像装置に適用され、 20

前記第 1 及び第 2 の被写体像を取得する像取得工程と、

3 つ以上の前記第 1 及び第 2 の被写体像にそれぞれ含まれる一対の消失点に基づいて、前記第 1 及び第 2 の結像手段の光軸と前記第 1 及び第 2 の結像手段の像面との交点に対応する画像中心 O_I (I は、第 1 の結像手段に対しては L 、第 2 の結像手段に対しては R 、以下同様とする) を校正する画像中心校正工程と、

前記画像中心校正工程で校正された前記画像中心 O_I 、及び、前記第 1 及び第 2 の被写体像にそれぞれ含まれる一対の消失点の前記画像中心 O_I からの距離を利用して、前記第 1 及び第 2 の結像手段の焦点距離 f_I を校正する焦点距離校正工程と、

3 つ以上の前記第 1 及び第 2 の被写体像に含まれており実空間での水平線に略平行な直線群の消失点及び前記直線群に略直交する直線群の消失点に基づいて、画像中心 O_I を原点として有すると共に前記第 1 及び第 2 の結像手段の像面に対応する $X_I Y_I$ 平面を有する 3 次元座標系としての第 1 及び第 2 の画像座標系の相対姿勢情報を取得する姿勢情報取得工程とを備えることを特徴とする撮像系パラメータの校正方法。 30

【発明の詳細な説明】

【技術分野】

【0001】

本発明は、撮像装置及び撮像系パラメータの校正方法に関するものである。

【背景技術】

【0002】

周囲 360 度の全天周画像を撮像する方法として、例えば、特許文献 1 に記載の撮像装置を用いた方法がある。特許文献 1 に記載の撮像装置は、魚眼レンズの光軸を中心とした全視野方向に、その光軸を基準として少なくとも各方向 90 度の画角を有する魚眼レンズを有する。特許文献 1 に記載の手法では、空間を 1 つの球体と考えた際に、その中心に上記撮像装置を配置し、まず、球体のうちの一方の半球体の画像を取得する。次に、撮像装置を 180 度回転させて反対方向の半球体の画像を取得する。このようにして取得した 2 つの画像を結合して球面画像を形成する。

【特許文献 1】特開 2000 - 221391 号公報

【発明の開示】

10

20

30

40

50

【発明が解決しようとする課題】

【0003】

ところで、近年では、床と天井や陸上と空などを同時にモニターできる監視カメラや、移動ロボットなどの移動体の視覚センサーとして、全方位の視覚情報を同時に取得できる撮像装置が求められている。しかしながら、特許文献1に記載の撮像装置を用いた手法では、撮像装置を回転させて全方位を撮影しているため、同一時刻における全天周の画像を得ることができない。

【0004】

そこで、本発明は、同一時刻における全天周の画像情報を取得可能な撮像装置、及び、その撮像装置に好適に適用できる撮像系パラメータの校正方法を提供することを目的とする。

10

【課題を解決するための手段】

【0005】

上記課題を解決するために、本発明に係る撮像装置は、外面が入射面としての第1の湾曲面となっている画角を有する第1の結像手段と外面が入射面としての第2の湾曲面となっている第2の結像手段とが結合されることによって構成される中空の像形成部と、像形成部の中心部に配置される光路変更素子と、第1の結像手段によって結像される第1の被写体像と第2の結像手段によって結像される第2の被写体像とを共に撮像する撮像手段と、を備え、第1及び第2の結像手段は、第1及び第2の湾曲面に入射する入射光線を像形成部の中心部に集光し、光路変更素子は、第1及び第2の結像手段の各々に入射した入射光線の光路を変更して撮像手段に入射させ、撮像手段は、第1の結像手段を通り光路変更素子によって光路が変更された入射光線に基づいて形成される第1の被写体像と第2の結像手段を通り光路変更素子によって光路が変更された入射光線に基づいて形成される第2の被写体像とを共に撮像することを特徴とする。

20

【0006】

上記撮像装置では、第1及び第2の結像手段が結合されて像形成部を構成しているため、像形成部の外面は第1及び第2の湾曲面を有することになる。これによって、像形成部の周囲の光が、像形成部内に取り込まれる。そして、第1及び第2の結像手段を通して像形成部内に取り込まれた光（入射光線）は、光路変更素子によって撮像手段側に伝搬するように光路が変更され、撮像手段が、第1及び第2の結像手段によって結像される第1及び第2の被写体像を共に取得する。

30

【0007】

この場合、第1及び第2の被写体像は、像形成部の周囲に位置する被写体からの光によって形成されることになるので、第1及び第2の被写体像から、像形成部を中心としたほぼ全方位の画像情報を球体の表面に有する球面画像を形成することが可能である。そして、像形成部を動かさずに第1及び第2の被写体像を上述した撮像手段で撮像しているため、同一時刻における全天周の球面画像を得ることができる。

【0008】

また、第1及び第2の結像手段を通った入射光線は、像形成部の中心部に集光されるので、像形成部は単一視点を有することになる。なお、球面画像を形成する観点から、第1及び第2の結像手段の画角は、180度であることが好適である。

40

【0009】

また、本発明に係る撮像装置は、第1及び第2の被写体像から、第1及び第2の被写体像に含まれる画像情報を球体の表面に有する球面画像を形成する画像形成手段を更に備え、画像形成手段は、第1及び第2の結像手段が有する焦点距離を f_I （ I は、第1の結像手段に対して L 、第2の結像手段に対して R 、以下同様とする）、第1及び第2の結像手段の光軸と第1及び第2の結像手段の像面との交点に対応する画像中心 O_I を原点として有すると共に像面に対応する X_I Y_I 平面を有する3次元座標系を第1及び第2の画像座標系としたとき、第1及び第2の被写体像に含まれる画像情報を、第1及び第2の画像座標系の画像中心 O_I を中心とする半球体の表面に有する第1及び第2の半球面画像に変換

50

する画像変換部と、画像変換部において得られた第1及び第2の半球面画像を、第1の画像座標系と第2の画像座標系の相対姿勢情報に基づいて結合することによって球面画像を形成する画像形成部とを備えることが好ましい。

【0010】

第1及び第2の被写体像が有する画像情報は、全天周のうちの半分毎の画像情報に相当する。そして、画像変換部は、第1及び第2の被写体像から第1及び第2の半球面画像を形成し、画像形成部がそれらを結合することによって球面画像を形成している。その結果、全天周の球面画像を確実に得ることが可能である。

【0011】

また、本発明に係る撮像装置が有する画像形成手段は、相対姿勢情報、画像中心 O_I 及び焦点距離 f_I を校正する校正部を更に備え、画像変換部は、校正部によって校正された画像中心 O_I 及び焦点距離 f_I に基づいて第1及び第2の被写体像を第1及び第2の半球面画像に変換し、画像形成部は、画像変換部で得られた第1及び第2の半球面画像を、校正部で校正された相対姿勢情報に基づいて結合して球面画像を形成することが好適である。

10

【0012】

この場合、校正部によって画像中心 O_I 、焦点距離 f_I 及び相対姿勢情報が校正され、画像変換部が、その校正された画像中心 O_I 、焦点距離 f_I 及び相対姿勢情報に基づいて第1及び第2の半球面画像及び球面画像を形成し、画像形成部がそれらを結合して球面画像を取得する。その結果として、より正確な球面画像を取得することができる。

20

【0013】

そして、第1及び第2の結像手段のそれぞれの中心線と第1及び第2の結像手段に入射する入射光線とのなす角度を θ_I とし、第1及び第2の結像手段に入射した入射光線と像面との交点に対応する X_I 、 Y_I 平面上の点の画像中心 O_I からの距離を r_I とし、焦点距離 f_I に依存しており距離 r_I の歪みパラメータを k_I としたとき、距離 r_I が、

【数1】

$$r_I(\theta_I) = \sum_{i=1}^{\infty} k_{I,2i-1} (f_I) \theta_I^{2i-1} \cdot \cdot \cdot \quad (1)$$

30

と表されており、校正部は、式(1)のうちの $2N-1$ (N は、2以上の整数)次までの項を選択した、

【数2】

$$r_I(\theta_I) = \sum_{i=1}^N k_{I,2i-1} (f_I) \theta_I^{2i-1} \cdot \cdot \cdot \quad (2)$$

を利用して、画像中心 O_I 、焦点距離 f_I 及び相対姿勢情報のうちの少なくとも一つを校正することが好ましい。

40

【0014】

式(1)は、第1及び第2の結像手段の結像特性に対応する。この式(1)から $2N-1$ 次までの N 個の項を利用して校正する際には、より多くの第1及び第2の被写体像を利用して校正することになるので、結果として、より正確な校正が可能である。また、式(2)を利用して校正する際には、歪みパラメータとしての k_I を算出することになり、その結果として、歪みパラメータの校正も可能である。この歪みパラメータ k_I は f_I に依存するため、歪みパラメータ k_I の算出は、焦点距離 f_I の校正に相当することになる。

【0015】

更にまた、本発明に係る撮像装置では、撮像手段は像形成部の内側に配置されており、画像形成手段は像形成部の外側に配置されており、撮像手段は、第1及び第2の被写体像

50

の画像情報を画像形成手段に送信する第1の通信部を有し、画像形成手段は、第1の通信部によって送信された第1及び第2の被写体像の画像情報を受信する第2の通信部を有することが好ましい。

【0016】

この場合、撮像手段が第1の通信部を有し、画像形成手段が第2の通信部を有するので、撮像手段によって取得された第1及び第2の被写体像の画像情報を確実に画像形成手段に入力することができる。そして、画像形成手段が像形成部の外側にあるので、例えば、像形成部を小型化することが可能である。

【0017】

また、本発明に係る撮像装置では、撮像手段及び画像形成手段は像形成部の外側に配置することもできる。 10

【0018】

ところで、従来 of 撮像装置では、魚眼レンズの光軸と像面との交点としての画像中心や魚眼レンズの焦点距離等が装置の組立誤差などによって設計値からずれるためそれらを校正する必要がある。また、上述したように2つの画像を組み合わせて球面画像を形成するためには、2つの画像を表す座標系の相対姿勢情報が必要となる。

【0019】

通常、撮像系パラメータとしての焦点距離や画像中心や相対姿勢情報の校正は、例えば次のようにして実施されていた。すなわち、魚眼レンズに入射した光と像面との交点の画像中心からの距離を r とし、入射光線と魚眼レンズの光軸とのなす角度を θ とし、魚眼レンズの焦点距離を f としたとき、 r が f や $2f \tan \theta$ などによって表される理論的な魚眼レンズの結像特性を利用して撮像系パラメータの校正が行われていた。 20

【0020】

しかしながら、監視カメラや移動体の視覚センサーでは正確な情報を取得することが必要であるため、撮像装置の撮像系パラメータのより正確な校正が求められてきているが、従来のように結像特性 (f や $2f \tan \theta$) を利用しても十分な校正ができなかった。

【0021】

そこで、本発明に係る撮像系パラメータ校正方法は、(1)入射面としての第1の湾曲面を有すると共に180度以上の画角を有する第1の結像手段と、(2)入射面としての第2の湾曲面を有すると共に180度以上の画角を有する第2の結像手段と、(3)第1の結像手段と第2の結像手段との間に配置されると共に第1及び第2の結像手段に入射した入射光線の光路を変更して同じ側に伝搬させる光路変更素子と、(4)第1の結像手段を通り光路変更素子によって光路が変更された入射光線に基づいて形成される第1の被写体像と第2の結像手段を通り光路変更素子によって光路が変更された入射光線に基づいて形成される第2の被写体像とを共に撮像する撮像手段とを備え、第1及び第2の結像手段が有する焦点距離を f_I (I は、第1の結像手段に対して L 、第2の結像手段に対して R 、以下同様とする)、第1及び第2の結像手段の光軸と第1及び第2の結像手段の像面との交点に対応する画像中心 O_I を原点として有すると共に像面に対応する $X_I Y_I$ 平面を有する3次元座標系を第1及び第2の画像座標系とし、第1及び第2の結像手段のそれぞれの中心線と第1及び第2の結像手段に入射する入射光線とのなす角度を θ_I とし、第1及び第2の結像手段に入射した入射光線と像面との交点に対応する $X_I Y_I$ 平面上の点の画像中心 O_I からの距離を r_I とし、焦点距離 f_I に依存しており距離 r_I の歪みパラメータを k_I としたとき、距離 r_I が、 30

【数3】

$$r_I(\theta_I) = \sum_{i=1}^{\infty} k_{I,2i-1} (f_I) \theta_I^{2i-1} \cdots \quad (3)$$

で表される撮像装置に対して適用され、画像中心 O_I 、焦点距離 f_I 、及び、第1の画像座標系と第2の画像座標系との相対姿勢情報を校正するパラメータ校正工程を備え、パラ 50

メータ校正工程は、画像中心 O_I 、焦点距離 f_I 、及び、相対姿勢情報のうちの少なくとも一つを、式(3)のうち $2N - 1$ (N は、2以上の整数)次の項までを選択した、

【数4】

$$r_I(\theta_I) = \sum_{i=1}^N k_{I,2i-1}(f_I) \theta_I^{2i-1} \cdots \quad (4)$$

を利用して校正することを特徴とする。

【0022】

式(3)は、歪みパラメータとしての k_I を含んだ第1及び第2の結像手段の結像特性を表している。そして、その $2N - 1$ 次までの項からなる式(4)を利用して画像中心 O_I 、焦点距離 f_I 、及び、相対姿勢情報のうちの少なくとも一つを校正するので、撮像系パラメータをより正確に校正できる。この歪みパラメータ k_I は、焦点距離 f_I に依存しているため、焦点距離 f_I の校正は、歪みパラメータ k_I を算出することに相当する。

【0023】

そして、本発明に係る撮像系パラメータの校正方法におけるパラメータ校正工程は、第1及び第2の被写体像を取得する像取得工程と、3つ以上の第1及び第2の被写体像にそれぞれ含まれる一対の消失点に基づいて画像中心 O_I を校正する画像中心校正工程と、 N 個以上の第1及び第2の被写体像に含まれる消失点の第1及び第2の画像座標系における位置座標、及び、式(4)を利用して焦点距離 f_I を校正する焦点距離校正工程と、3つ以上の第1及び第2の被写体像に含まれており実空間での水平線に略平行な直線群の消失点及び直線群に略直交する直線群の消失点に基づいて、第1及び第2の画像座標系の相対姿勢情報を取得する姿勢情報取得工程とを備えることが好適である。

【0024】

例えば、画像中心 O_I は、第1及び第2の被写体像にそれぞれ含まれる一対の消失点の交点に基づいて求められるので、2つの第1及び第2の被写体像があれば校正できるが、上記方法では3つ以上の第1及び第2の被写体像にそれぞれ含まれる一対の消失点に基づいて画像中心 O_I を校正しているため、より正確な画像中心 O_I が得られる。

【0025】

更に、式(4)では、式(1)から N 個の項が選択されているため、結果として、 N 個の k_I が含まれることになる。そして、 N 個以上の第1及び第2の被写体像に含まれる一対の消失点の位置座標を利用することによって k_I を決定でき、その結果として、距離 f_I を校正できる。また、3つ以上の第1及び第2の被写体像にそれぞれ含まれる実空間での水平線に略平行な直線群の消失点と、その直線群に直交する直線群の消失点に基づいて相対姿勢情報を校正するので、例えば、2つの第1及び第2の被写体像に基づいて校正する場合よりもより正確に校正できる。

【0026】

更にまた、本発明に係るパラメータ校正方法が有するパラメータ校正工程は、第1及び第2の被写体像を取得する像取得工程と、像取得工程で取得された第1及び第2の被写体像の画像情報を、第1及び第2の画像座標系での画像中心 O_I を中心とした半球体の表面に有する第1及び第2の半球面画像に変換する第1の画像変換工程と、式(4)の逆関数を $(r_I; k_{I,1} \sim k_{I,2i-1})$ (ただし、 i は、 N までの2以上の整数)として、 θ_I を、

【数5】

$$\theta_I = \eta(r_I; k_{I,1} \sim k_{I,2i-1}) \cdots \quad (5)$$

とし、第1及び第2の結像手段の校正後の画像中心の位置座標を $(x_{I,c}, y_{I,c})$ 、実空間での直線パターンの投影像内の点の X_I, Y_I 平面における位置座標を (x_I, y_I)

I) とし、距離 r_I を、

【数 6】

$$r_I = \sqrt{(x_I - x_{I,c})^2 + (y_I - y_{I,c})^2} \cdots (6)$$

とし、 I を、

【数 7】

$$\phi_I = \arctan(y_I - y_{I,c}, x_I - x_{I,c}) \cdots (7)$$

10

とし、式(5)~式(7)に基づいて表されると共に第1及び第2の半球面画像が有する直線パターンの投影像を含む平面の法線ベクトル n_I が、第1及び第2の画像座標系が有する Z_I 軸となす角度を I_n とし、法線ベクトル n_I が X_I 軸となす角度を I_n とし、前述した平面の方程式に基づいた評価関数 ξ_1 を

【数 8】

$$\xi_1 = \sum_{l=1}^F \sum_{p=1}^{P_l} (\sin \theta_{Inl} \cos \phi_{Inl} \sin \theta_{Ipl} \cos \phi_{Ipl} + \sin \theta_{Inl} \sin \phi_{Inl} \sin \theta_{Ipl} \sin \phi_{Ipl} + \cos \theta_{Inl} \cos \theta_{Ipl})^2 \cdots (8)$$

20

としたとき、式(8)を最小にするように $x_{I,c}$ 、 $y_{I,c}$ 、 $k_{I,1} \sim k_{I,2i-1}$ を決めることによって内部パラメータとしての画像中心 O_I 及び焦点距離 f_I を校正する内部パラメータ校正工程と、撮像手段によって同時に取得された一对の第1及び第2の被写体像の画像情報を、内部パラメータ校正工程で校正された画像中心 O_I を中心とする半球体の表面に有する第1及び第2の半球面画像に変換する第2の画像変換工程と、第2の画像変換工程で得られた第1の半球面画像が有する実空間での直線パターンの投影像を含む平面の法線ベクトルを n_L とし、第2の画像変換工程で得られた第2の半球面画像が有する実空間での直線パターンの投影像を含む平面の法線ベクトルを n_R とし、校正された画像中心 O_I を原点とする第2の画像座標系から第1の画像座標系への変換行列を R_{LR} とし、評価関数 ξ_2 を、

30

【数 9】

$$\xi_2 = \sum_{i=1}^n (n_{L,i} - R_{LR} n_{R,i})^2 \cdots (9)$$

としたとき、式(9)を最小にする変換行列 R_{LR} を決定することによって相対姿勢情報を校正する相対姿勢情報校正工程とを備えることが好適である。

【0027】

40

式(5)~式(7)より、式(8)で表される評価関数 ξ_1 の I_n 、 I_n 、 I_n 、 I_n は、 $x_{I,c}$ 、 $y_{I,c}$ 、 $k_{I,1} \sim k_{I,2i-1}$ の関数である。従って、式(8)を利用することで画像中心 O_I 及び焦点距離 f_I を一緒に校正することができるので、校正に要する時間が短くなる。更に、式(5)より、 I_n 、 I_n には、歪みパラメータ k_I が含まれているので、歪みパラメータ k_I も算出できる。これは、焦点距離 f_I の校正に相当し、焦点距離 f_I をより正確に校正できることになる。

【0028】

このようにして校正された画像中心 O_I 及び焦点距離 f_I を利用して、第2の画像変換工程では、撮像手段によって同時に取得された第1及び第2の被写体像から第1及び第2の半球面画像が形成される。この第1及び第2の半球面画像には、実空間での同じ直線パ

50

ターンが含まれている。この場合、その直線パターンの第1の半球面画像内の像を含む平面の法線ベクトル n_L は、 $R_{L,R} n_R$ で表されることになる。したがって、式(9)を最小にする変換行列 $R_{L,R}$ を求めることで最適な変換行列 $R_{L,R}$ を決定することができる。

【数10】

更にまた、本発明に係るパラメータ校正方法が有するパラメータ校正工程は、第1及び第2の被写体像を取得する像取得工程と、第1及び第2の被写体像の画像情報を、第1及び第2の画像座標系での画像中心 O_I を中心とした半球体の表面に有する第1及び第2の半球面画像に変換する画像変換工程と、式(4)の逆関数を $(r_I; k_{I,1} \sim k_{I,2i-1})$ (ただし、 i は、 N までの2以上の整数)として、 θ_I を、

【数10】

$$\theta_I = \eta(r_I; k_{I,1} \sim k_{I,2i-1}) \cdots (10)$$

10

とし、第1の結像手段の校正後の画像中心の位置座標を $(x_{I,c}, y_{I,c})$ とし、第1及び第2の被写体像に含まれる点の $X_I Y_I$ 平面での位置座標を (x_I, y_I) とし、距離 r_I を、

【数11】

$$r_I = \sqrt{(x_I - x_{I,c})^2 + (y_I - y_{I,c})^2} \cdots (11)$$

20

とし、 ϕ_I を、

【数12】

$$\phi_I = \arctan(y_I - y_{I,c}, x_I - x_{I,c}) \cdots (12)$$

としたときに、第1及び第2の半球面画像のうち位置座標 (x_I, y_I) に対応する点の位置ベクトル m_I を、

【数13】

$$m_I = [\sin \theta_I \cos \phi_I \quad \sin \theta_I \sin \phi_I \quad \cos \theta_I]^T \cdots (13)$$

30

とし、第2の画像座標系から第1の画像座標系への変換行列を $R_{L,R}$ としたとき、第2の画像座標系で表される位置ベクトル m_R を、変換行列 $R_{L,R}$ によって第1の画像座標系で表すことによって第1の画像座標系で表される球面画像を形成する画像形成工程と、画像形成工程において形成された球面画像上の点 m の位置ベクトルを、

【数14】

$$m = [u \quad v \quad s]^T \cdots (14)$$

40

としたとき、点 m に対応する実空間の点を M_c とし、第1の画像座標系に回転行列 R

【数15】

$$R = [j_1 \quad j_2 \quad j_3] \cdots (15)$$

及び、並進行列 T

【数 1 6】

$$T = \begin{bmatrix} t_x & t_y & t_z \end{bmatrix} \cdot \cdot \cdot \quad (16)$$

を利用して変換できる 3 次元座標系としての世界座標系における点 M_c の位置ベクトルを、

【数 1 7】

$$M_w = \begin{bmatrix} X_w & Y_w & Z_w \end{bmatrix} \cdot \cdot \cdot \quad (17)$$

10

として、 N_w を

【数 1 8】

$$N_w = \begin{bmatrix} X_w & Y_w & Z_w & 1 \end{bmatrix} \cdot \cdot \cdot \quad (18)$$

とし、評価関数 C を、

【数 1 9】

$$C = \sum_{i=1}^n \left(s_i j_1^T N_{wi} - u_i j_3^T N_{wi} + s_i t_x - u_i t_z \right)^2 \\ + \sum_{i=1}^n \left(s_i j_2^T N_{wi} - v_i j_3^T N_{wi} + s_i t_y - v_i t_z \right)^2 \cdot \cdot \cdot \quad (19)$$

20

としたとき、式 (19) を最小にする $x_{I,c}$ 、 $y_{I,c}$ 、 $k_{I,1} \sim k_{I,2i-1}$ (ただし、 i は N までの 2 以上の整数) 及び変換行列 $R_{L,R}$ を決定することによって、画像中心 O_I 、前記焦点距離 f_I 及び前記相対姿勢情報を校正する校正工程とを備えることを特徴とする

この場合、球面画像は、第 2 の画像座標系で表される第 2 の半球面画像の点 m_R を変換行列 $R_{L,R}$ によって第 1 の画像座標系の点に変換することで第 1 及び第 2 の半球面画像を結合して形成されている。したがって、球面画像上の点 m の位置ベクトルは、位置ベクトル m_L 又は位置ベクトル $R_{L,R} m_R$ によって表されることになる。

30

【0030】

式 (10) ~ 式 (13) より、位置ベクトル m が位置ベクトル m_L に一致するときは、式 (13) に含まれる u 、 v 、 s は、 $x_{L,c}$ 、 $y_{L,c}$ 、 x_L 、 y_L 及び $k_{L,1} \sim k_{L,2i-1}$ の関数になり、位置ベクトル m が位置ベクトル m_R に一致するときは、 u 、 v 、 s は、 $x_{R,c}$ 、 $y_{R,c}$ 、 x_R 、 y_R 、 $k_{R,1} \sim k_{R,2i-1}$ 、及び、 $R_{L,R}$ の関数になる。したがって、式 (18) を最小にするように $x_{I,c}$ 、 $y_{I,c}$ 、 $k_{I,1} \sim k_{I,2i-1}$ 及び変換行列 $R_{L,R}$ を決定することで、画像中心 O_I 、焦点距離 f_I 及び相対姿勢情報をより正確に校正できることになる。

40

【0031】

また、本発明に係る撮像系パラメータの校正方法は、入射面としての第 1 の湾曲面を有すると共に 180 度以上の画角を有する第 1 の結像手段と、入射面としての第 2 の湾曲面を有すると共に 180 度以上の画角を有する第 2 の結像手段と、第 1 の結像手段と第 2 の結像手段との間に配置されると共に第 1 及び第 2 の結像手段に入射した入射光線の光路を変更して同じ側に伝搬させる光路変更素子と、第 1 の結像手段を通り光路変更素子によって光路が変更された入射光線に基づいて形成される第 1 の被写体像と第 2 の結像手段を通り光路変更素子によって光路が変更された入射光線に基づいて形成される第 2 の被写体像とを共に撮像する撮像手段とを備える撮像装置に適用され、第 1 及び第 2 の被写体像を取得する像取得工程と、3 つ以上の第 1 及び第 2 の被写体像にそれぞれ含まれる一対の消失

50

点に基づいて、第 1 及び第 2 の結像手段の光軸と第 1 及び第 2 の結像手段の像面との交点に対応する画像中心 O_I (I は、第 1 の結像手段に対しては L 、第 2 の結像手段に対しては R 、以下同様とする) を校正する画像中心校正工程と、画像中心校正工程で校正された画像中心 O_I 、及び、第 1 及び第 2 の被写体像にそれぞれ含まれる一対の消失点の画像中心 O_I からの距離に基づいて、第 1 及び第 2 の結像手段の焦点距離 f_I を校正する焦点距離校正工程と、3 つ以上の第 1 及び第 2 の被写体像に含まれており実空間での水平線に略平行な直線群の消失点及び直線群に略直交する直線群の消失点に基づいて、画像中心 O_I を原点として有すると共に第 1 及び第 2 の結像手段の像面に対応する $X_I Y_I$ 平面を有する 3 次元座標系としての第 1 及び第 2 の画像座標系の相対姿勢情報を取得する姿勢情報取得工程とを備えることを特徴とする。

10

【 0 0 3 2 】

この場合、上記方法では 3 つ以上の第 1 及び第 2 の被写体像にそれぞれ含まれる一対の消失点に基づいて画像中心 O_I を校正しているので、より正確な画像中心 O_I が得られる。

【 0 0 3 3 】

また、画像中心 O_I から消失点までの距離は、第 1 及び第 2 の結像手段の結像特性に依存している。そして、上記方法では、画像中心校正工程で校正された画像中心 O_I と、その画像中心 O_I から消失点までの距離に基づいて焦点距離 f_L を校正するので、第 1 及び第 2 の結像手段の結像特性に応じて焦点距離 f_L を校正できる。そして、3 つ以上の第 1 及び第 2 の被写体像にそれぞれ含まれる実空間での水平線に略平行な直線群の消失点と、その直線群に直交する直線群の消失点に基づいて相対姿勢情報を校正するので、例えば、2 つの第 1 及び第 2 の被写体像に基づいて校正する場合よりもより正確に校正できる。

20

【 発明の効果 】

【 0 0 3 4 】

本発明の撮像装置によれば、同時刻に全天周の球面画像を形成することができる。そして、本発明の撮像系パラメータの校正方法によれば、同時刻に全天周の球面画像を形成するための撮像装置をより正確に校正することが可能である。

【 発明を実施するための最良の形態 】

【 0 0 3 5 】

以下、図を参照して本発明の好適な実施形態について説明する。尚、以下の説明においては、同一の要素には同一の符号を用いることとし重複する説明は省略する。

30

【 0 0 3 6 】

(第 1 の実施形態)

まず、本実施形態の撮像装置で得るべき球面画像について説明する。本実施形態において球面画像とは、全天周 (全方位 3 6 0 度) に位置する各被写体の画像情報が球体の表面に投影されたものである。図 1 を参照してより具体的に説明する。

【 0 0 3 7 】

図 1 は、球面画像を説明する図である。図 1 に示すように、空間上に単位半径の球体 1 を考え、その中心 O_1 を原点として互いに直交する X 軸、 Y 軸、 Z 軸を設定する。空間上の任意の点 M と球の中心 O_1 とを結ぶ直線と球体 1 の表面 2 上の交点を m とする。また、点 m と原点 O_1 とを結ぶ直線の Z 軸からの仰角を θ とし、 X 軸からの方位角を ϕ とすると、点 m の位置ベクトルは、

40

【 数 2 0 】

$$m = [\sin \theta \cos \phi \quad \sin \theta \sin \phi \quad \cos \theta] \cdot \cdot \cdot \quad (20)$$

と表される。

【 0 0 3 8 】

この点 m は点 M が球体の表面へ投影された点に相当する。すなわち、点 M からの光が中

50

心 O_1 に向かって進んでいるときに球体1の表面2と交わる点が m であり、点 m は点 M からの光が担う画像を形成するために必要な情報(画像情報)を有している。したがって、球体1の表面2には、中心 O_1 を視点としたときの周囲360度に位置する被写体を投影することができる。このように画像情報を有している球体1の表面2が球面画像に相当する。そして、このように被写体像を球面画像として表す、言い換えれば、被写体を球体の表面上に射影することを球面射影モデルとも称す。

【0039】

この球面画像は、例えば、画角180度を有する一对の魚眼レンズを利用して周囲360度のうち半分ずつ(すなわち周囲180度ずつ)を撮影して得られる一对の被写体像から形成される。

【0040】

図2(a)は、魚眼レンズの結像特性を示す模式図である。図2に示した3次元座標系は、魚眼レンズの光学中心を原点とすると共に、魚眼レンズの光軸3をZ軸としたものである。ここで、光学中心とは、魚眼レンズに入射した入射光線11が集光する点である。以下、このような座標系をカメラ座標系と称す。

【0041】

図2(a)に示すように、実空間上の点 M を魚眼レンズを利用して結像する場合、点 M からの入射光線11は、光軸3に直交すると共に、光学中心から魚眼レンズの焦点距離 f のところに位置する像面5に投影されることになる。

【0042】

図2(b)は、魚眼レンズの像面を示す図である。像面5は、前述したようにZ軸(光軸3)に直交する面である。この像面5とZ軸との交点を画像中心 O_2 とする。この場合、点 M は、魚眼レンズによって、XY平面上の座標(r ,)で表される点 q に投影される。画像中心 O_2 から点 q までの距離 r は使用する魚眼レンズの結像特性によって決まる。魚眼レンズの結像特性としては、等距離射影方式(equidistance projection)や、正射影方式(orthogonal projection)、ステレオ射影方式(stereographic projection)、等立体角射影方式(equisolid angle projection)が挙げられる。以下の説明では、代表的な魚眼レンズの結像特性の一つとしての等立体角射影方式、

【数21】

$$r = 2f \sin\left(\frac{\theta}{2}\right) \cdot \cdot \cdot \quad (21)$$

で射影されるものとする。ここで、仰角 θ は、魚眼レンズに入射する入射光線11と魚眼レンズの光軸3とのなす角度である。なお、他の射影方式も式と同様に、 r が θ の関数として表される。

【0043】

式(21)より r が分かれば仰角 θ が算出されることになるので、式(20)に示すように、極座標で表される点 m の座標が算出されることになる。1つの魚眼レンズで得られる被写体像は、全天周のうちの半分に相当するので、2つの魚眼レンズで得られた被写体像をそれぞれの画像中心を原点とする極座標で表して半球面画像を形成したのち、それらを結合することで、1つの球面画像を得られることになる。本明細書では、平面画像としての被写体像を、極座標で表すことを半球面画像に変換する、又は、球面画像に変換すると称す。

【0044】

ところで、画像座標系とカメラ座標系とは一方をZ軸方向に並進させることで重ね合わせられるので、同じものとして考えることができる。特に、球面画像を表す場合、すなわち、魚眼レンズで結像された被写体像を極座標表示する際には、 r 及び θ は、画像座標系で表す場合もカメラ座標系で表す場合も同じである。したがって、以下では、特に断らない限り、画像座標系とカメラ座標系とは同じものとする。

10

20

30

40

50

【0045】

以上説明したような球面画像を形成する装置について具体的に説明する。

【0046】

図3は、本発明の撮像装置の一実施形態の構成を示す概略構成図である。撮像装置10Aは、外形が略球状の球面視覚センサー20を有する。

【0047】

球面視覚センサー20は、外形が略球状であって中空の像形成部21を有する。像形成部21は、第1の結像手段としての魚眼レンズ22と、第2の結像手段としての魚眼レンズ23とが結合されたものである。魚眼レンズ22, 23はそれらが有する入射面としての第1及び第2の湾曲面22a, 23aの中心線22b, 23bに対して回転対称体となるように構成されている。そして、魚眼レンズ22, 23は、第1及び第2の湾曲面22a, 23aが外側を向くと共に、鏡面对称になるように配置されて結合されている。また、魚眼レンズ22, 23は、図2で説明した結像特性を有しており、魚眼レンズ22, 23の射影方式は、式(21)で示した等立体角射影方式である。

10

【0048】

図3では、魚眼レンズ22, 23は、1つのレンズからなるように記載しているが、魚眼レンズ22, 23は像形成部21の径方向に沿って複数のレンズを有しており、式(21)の結像特性をするように構成されている。また、魚眼レンズ22, 23は、第1及び第2の湾曲面22a, 23aの各点に接する接平面(例えば、図中の平面d)に垂直に入射した光は、球面視覚センサー20の中心部24を通るように設計されている。これによって、球面視覚センサー20は、単一の視点を有することになる。

20

【0049】

球面視覚センサー20の中心部24には、魚眼レンズ22, 23に入射した入射光線12の光路を変更する光路変更素子25が配置されている。光路変更素子25は、例えば、直交する2つの面に鏡面が形成された直角プリズムである。前述したように魚眼レンズ22, 23は、複数のレンズから構成されており、それらのレンズ内で光を屈折させているので、結果として光が通っていない領域もある。光路変更素子25は、そのような領域を利用して魚眼レンズ22, 23に保持されることで像形成部21内に配置されている。光路変更素子25は、魚眼レンズ22, 23から入射した入射光線12を同じ方向(例えば、図中の下側)に伝搬させて、その光路上に位置する撮像手段26に入射させる。

30

【0050】

撮像手段26は、CCD等の撮像素子27を有する。撮像素子27は、複数の画素からなる受光面27aが、魚眼レンズ22, 23の像面5L, 5Rに位置するように配置されている。撮像手段26も光路変更素子25と同様に、魚眼レンズ22, 23のうち光が通っていない領域を利用して魚眼レンズ22, 23に対して保持されることで像形成部21内に配置されている。

【0051】

撮像素子27は、図4に示すように、魚眼レンズ22, 23に入射した入射光線12によって形成される第1及び第2の被写体像31, 32を同時に取得する。この撮像素子27上に結像され取得された第1及び第2の被写体像31, 32は、受光面27aを構成する画素ごとに電気信号に変換されて、撮像手段26の一部を構成する第1の通信部28に入力される。第1の通信部28は、入力された画像情報を有する電気信号を電波に変換して、画像形成手段40に送信する。

40

【0052】

図3に示すように、画像形成手段40は、CPUなどを備えたいわゆるコンピュータであり、撮像素子27で取得された第1及び第2の被写体像31, 32から球面画像を形成する。画像形成手段40は、第2の通信部41と、パラメータ格納部42と、画像変換部43と、画像形成部44と、校正部45Aとを有する。

【0053】

パラメータ格納部42は、魚眼レンズ22の焦点距離 f_L 及び魚眼レンズ23の焦点距

50

離 f_R を格納している。また、パラメータ格納部 4 2 は、魚眼レンズ 2 2 の光軸と像面 5 との交点としての画像中心 O_L 及び、魚眼レンズ 2 3 の光軸と像面 5 との交点としての画像中心 O_R の座標を格納している。前述したように魚眼レンズ 2 2, 2 3 に入射した光は、光路変更素子 2 5 によって光路が変更される。そのため、魚眼レンズ 2 2, 2 3 の光軸とは、魚眼レンズ 2 2, 2 3 の中心線（すなわち、第 1 及び第 2 の湾曲面 2 2 a, 2 3 a の中心線 2 2 b, 2 3 b）に沿って入射した光の進行方向に一致するものとする。

【0054】

更に、パラメータ格納部 4 2 は、図 5 に示すように、画像中心 O_L を原点として設定される三次元座標系 ($X_L Y_L Z_L$ 座標系) としての第 1 の画像座標系 S_L と、画像中心 O_R を原点として設定される三次元座標系 ($X_R Y_R Z_R$ 座標系) としての第 2 の画像座標系 S_R の相対姿勢情報を格納している。この相対姿勢情報は、第 2 の画像座標系 S_R から第 1 の画像座標系 S_L への変換行列 $R_{L R}$ に相当する。そして、像形成部 2 1 では、魚眼レンズ 2 2, 2 3 の視点は一致しているので、変換行列 $R_{L R}$ は、回転行列に相当することになる。なお、パラメータ格納部 4 2 が格納している画像中心 O_L, O_R 、焦点距離 f_L, f_R 及び変換行列 $R_{L R}$ は、初期値としては、球面視覚センサー 2 0 の設計値が格納されている。

10

【0055】

画像変換部 4 3 は、平面画像である第 1 の被写体像 3 1 を、図 2 を利用して説明した方法によって、第 1 の被写体像 3 1 が有する画像情報を半球体の表面に有する第 1 の半球面画像に変換する。また、画像変換部 4 3 は、平面画像である第 2 の被写体像 3 2 を、図 2 を利用して説明した方法によって、第 2 の被写体像 3 2 が有する画像情報を半球体の表面に有する半球面画像に変換する。ただし、入射角 θ_L は、魚眼レンズ 2 2 については、入射光線 1 1 と中心線 2 2 b とのなす角度 θ_L を意味し、魚眼レンズ 2 3 については、入射光線 1 1 と中心線 2 3 b とのなす角度 θ_R を意味する。

20

【0056】

このように、第 1 及び第 2 の半球面画像を形成するとき、画像変換部 4 3 は、パラメータ格納部 4 2 に格納されている撮像系パラメータとしての画像中心 O_L, O_R 、焦点距離 f_L, f_R 及び変換行列 $R_{L R}$ に基づいて第 1 及び第 2 の半球面画像を形成することになる。その結果として、第 1 の半球面画像は第 1 の画像座標系 O_L で表され、第 2 の半球面画像は第 2 の画像座標系 O_R で表される。

30

【0057】

画像形成部 4 4 は、画像変換部 4 3 において形成された第 1 及び第 2 の半球面画像を、第 1 及び第 2 の画像座標系 O_L, O_R の相対姿勢情報としての変換行列 $R_{L R}$ 、及び、画像中心 O_L, O_R に基づいて合成して球面画像を形成する。より具体的には、第 1 及び第 2 の半球面画像の画像中心 O_L, O_R を一致させ、第 2 の半球面画像を変換行列 $R_{L R}$ で第 1 の画像座標系 O_L 上の点に変換することで球面画像を形成する。

【0058】

上記のように球面画像は、撮像系パラメータ（画像中心、焦点距離、相対姿勢情報）を利用して形成されている。したがって、撮像系パラメータが撮像装置 1 0 A において校正される必要がある。そこで、校正部 4 5 A は、実空間における平行な直線群（以下、平行直線群とも称す）の消失点を利用して撮像系パラメータを校正する。校正部 4 5 A が消失点を利用して撮像系パラメータを校正する方法について説明する。校正部 4 5 A は、CPU 等を有する画像形成手段 4 0 に予め記録されている所定のプログラムを実行することによって次に示す方法によって撮像系パラメータを校正する。

40

【0059】

魚眼レンズ 2 2 は、画角 180 度を有しているため、第 1 の被写体像 3 1 内には、図 6 に示すように、第 1 の画像座標系 S_L における $X_L Y_L$ 平面において、画像中心 O_L から距離 r_1, r_2 の位置に一对の消失点（消失点对） V_1, V_2 が現れる。この消失点の位置は、例えば、上記平行直線群に含まれる直線に対応する像としての曲線を円錐曲線でフィッティングし、複数の円錐曲線関数を算出したのち、それらの交点を求めることで算出

50

される。一対の消失点 V_1, V_2 を結ぶ直線は、

【数 2 2】

$$aX_L + bY_L + c = 0 \cdots (22)$$

であり、この直線上に画像中心 O_L が位置する。したがって、校正部 4 5 A は、校正後の画像中心 O_L を $C_L(x_{L,c}, y_{L,c})$ としたときに、次の評価関数 1

【数 2 3】

$$\Gamma 1 = \sum_{i=1}^n (a_i X_{L,c} + b_i Y_{L,c} + c_i)^2 \cdots (23)$$

10

を最小にすることで画像中心 C_L を算出する。ここでは、魚眼レンズ 2 2 について説明したが、魚眼レンズ 2 3 についても同様であるので、魚眼レンズ 2 3 については説明を省略する。

【0 0 6 0】

ところで、式 (2 1) に示した結像特性をテラ展開すると、

【数 2 4】

$$r_I(\theta_I) = \sum_{i=1}^{\infty} k_{I,2i-1} (f_I) \theta_I^{2i-1} \cdots (24)$$

20

となる。I は、魚眼レンズ 2 2 に対しては L であり、魚眼レンズ 2 3 に対しては R であり、以下同様とする。k_I は、テラ展開の係数であり、焦点距離 f_I に依存する。そして、この k_I によって、例えば、図 6 に示すように、 $r_{L,1}, r_{L,2}$ の長さの違いが生じることになるので、k_I は、結像点の画像中心 O_I に対する径方向の歪みを表す放射歪み (radial distortion) パラメータである。この放射歪みパラメータとしての k_I を算出することにより、球面視覚センサー 2 0 における結像特性がより正確に求められることになる。

30

【0 0 6 1】

そこで、校正部 4 5 A は、放射歪みパラメータとしての k_I を算出する。ただし、式 (2 4) では、無限個の項があるため、式 (2 4) のうち低次の項から 3 個までの項で表される、

【数 2 5】

$$r_I(\theta_I) = \sum_{i=1}^3 k_{I,2i-1} (f_I) \theta_I^{2i-1} = k_{I,1} \theta_I + k_{I,3} \theta_I^3 + k_{I,5} \theta_I^5 \cdots (25)$$

を利用して放射歪みパラメータ $k_{I,1}, k_{I,3}, k_{I,5}$ を算出する。

40

【0 0 6 2】

先ず、魚眼レンズ 2 2 に対する放射歪みパラメータ $k_{L,1}, k_{L,3}, k_{L,5}$ を算出する方法について説明する。消失点 V_1, V_2 に対して式 (2 5) を適用すると、

【数 2 6】

$$r_{L,1} = k_{L,1} \theta_{L,1} + k_{L,3} \theta_{L,1}^3 + k_{L,5} \theta_{L,1}^5 \cdots (26)$$

【数 27】

$$r_{L,2} = k_{L,1} \theta_{L,2} + k_{L,3} \theta_{L,2}^3 + k_{L,5} \theta_{L,2}^5 \cdots (27)$$

となる。この際、画像中心 O_I を校正している場合には、焦点距離 f_L をより正確に校正する観点から $r_{L,1}$ 及び $r_{L,2}$ は、校正された画像中心 O_I に対する距離であることが好ましい。

【0063】

また、消失点 V_1, V_2 は、実空間での直線パターンを無限に延ばしたときの無限遠点の投影像に対応するため、そのような無限遠点から魚眼レンズ 22, 23 へ入射する入射光線 l_1 と魚眼レンズ 22, 23 との光軸とのなす角度である $\theta_{L,1}$ と $\theta_{L,2}$ に対しては、

【数 28】

$$\theta_{L,1} + \theta_{L,2} = \pi \cdots (28)$$

が成り立つ。式 (26) ~ 式 (28) において、未知数は 3 つ ($k_{L,1}, k_{L,3}, k_{L,5}$) であるので、少なくとも 3 つ以上の第 1 の被写体像 31 に対して一对の消失点 V_1, V_2 を算出することで $k_{L,1}, k_{L,3}, k_{L,5}$ を決定することができる。同様に、魚眼レンズ 23 に対する放射歪みパラメータ $k_{R,1}, k_{R,3}, k_{R,5}$ も決定する。

【0064】

前述したように、 $k_{L,1}, k_{L,3}, k_{L,5}$ は、焦点距離 f_L に依存しており、 $k_{R,1}, k_{R,3}, k_{R,5}$ は、焦点距離 f_R に依存している。その結果、放射歪みパラメータ $k_{L,1}, k_{L,3}, k_{L,5}, k_{R,1}, k_{R,3}, k_{R,5}$ を決定することは、より正確に焦点距離 f_L, f_R を算出することに相当する。したがって放射歪みパラメータ k_L, k_R を算出することを焦点距離 f_L, f_R の校正とも称す。

【0065】

以上のようにして魚眼レンズ 22, 23 の画像中心 C_L, C_R 及び焦点距離 f_L, f_R を算出したのちに、校正部 45A は、それらに基づいて第 1 の画像座標系 S_L と第 2 の画像座標系 S_R との相対姿勢情報を算出する。相対姿勢情報は、前述したように第 2 の画像座標系 S_R から第 1 の座標座標系 S_L に変換するための変換行列 $R_{L,R}$ に相当するが、球面視覚センサー 20 では、視点が一致しているので、この変換行列 $R_{L,R}$ は、回転行列に相当する。

【0066】

前述したように第 1 及び第 2 の被写体像 31, 32 には消失点 V_1, V_2 が現れるので、第 1 及び第 2 の被写体像 31, 32 から形成される第 1 及び第 2 の半球面画像にも消失点が見れる。通常、第 1 及び第 2 の半球面画像には、実空間における水平線に略平行な直線群の像及びその消失点（以下、「第 1 消失点」という）、並びに、水平線に直交する方向（鉛直方向）に延びる直線に略平行な直線群の像及びその消失点（以下、「第 2 消失点」という）が見れている。

【0067】

ここで、第 1 消失点の位置ベクトルを p_{1hc} とし、第 2 消失点の位置ベクトルを p_{1vc} とする。そして、3次元座標系である世界座標での第 1 消失点の位置ベクトルを p_{hw} とし、第 2 消失点の位置ベクトルを p_{vw} とする。この場合、世界座標系から第 1 の画像座標系 S_L への回転行列を R_{1cw} とすると以下の式が成り立つ。

【数 29】

$$p_{1vc}^L = R_{1cw} \cdot p_{vw} \cdots (29)$$

10

20

30

40

50

【数 3 0】

$$p2_{hc} = R1_{cw} \cdot p_{hw2} \cdot \cdot \cdot (30)$$

R 1_{cw} は上述したように回転行列であって、3つの変数が含まれているが、(式 29) 及び(式 30)を用いることで、6個の方程式が成り立つため、R 1_{cw}を算出可能である。

【0068】

ところで、第1及び第2の半球面画像を結合することによって1つの球面画像を形成した場合、第1の半球面画像の第1消失点と第2の半球面画像の第1消失点とは一致し、第1の半球面画像の第2消失点と第2の半球面画像の第2消失点とは一致する。したがって、(式 29) 及び(式 30)における p_{hw} 及び p_{vw} は、第2の半球面画像の第1消失点 p_{2hc} 及び第2消失点 p_{2vc} にも変換可能である。すなわち、世界座標系から第2の画像座標系 S_R への変換行列を R 2_{cw} とすると、以下の式が成り立つ。

【数 3 1】

$$p2_{vc} = R2_{cw} \cdot p_{vw1} \cdot \cdot \cdot (31)$$

【数 3 2】

$$p2_{hc} = R2_{cw} \cdot p_{hw2} \cdot \cdot \cdot (32)$$

(式 31) 及び(式 32)より R 2_{cw} が算出できる。

【0069】

そして、式(29)と式(30)、又は、(式 31)と(式 32)より、R 1_{cw} 及び R 2_{cw} に基づいて第2の画像座標系 S_R から第1の画像座標系 S_L への回転行列 R_{LR} を算出することができる。

【0070】

次に、撮像装置 10A における撮像系パラメータの校正方法についてより具体的に説明する。撮像系パラメータの校正では、図7に示すような3つの黒色の直線パターン 51 が含まれた校正用チャート 50 を利用する。なお、消失点を算出するため、球面視覚センサー 20 に対して校正用チャート 50 は十分大きいものとする。

【0071】

続いて、撮像装置 10A の配置を変えながら、図8(a)～図8(d)に示すように、校正用チャート 50 を複数(図8では、4枚)撮影する(像取得工程)。そして、校正部 45A は、複数の第1の被写体像 31 に対して前述したように消失点对(一对の消失点) V₁, V₂ の位置を算出し、式(23)に示す評価関数 1 を最小にする x_{L,c}, y_{L,c} を算出する(画像中心校正工程)。これは、例えば、ラグランジュ未定乗数法等に基づいて実施すればよい。

【0072】

そして、校正部 45A が、算出した x_{L,c}, y_{L,c} を新しい画像中心 O_L としてパラメータ格納部 42 に入力することで画像中心 O_L が校正されることになる。

【0073】

次に、撮像装置 10A を像形成部 21 の中心部 24 を通ると共に、魚眼レンズ 22, 23 の中心線 22b, 23b に略直交する直線を中心として回転させながら、図9(a)～図9(c)に示すように、校正用チャート 50 を3枚撮像する。そして、校正部 45A は、3枚の第1の被写体像 31 に対して一对の消失点 V₁, V₂ を算出する。次いで、式(26)～式(28)を利用して放射歪みパラメータ k_{L,1}, k_{L,3}, k_{L,5} を算出

し、パラメータ格納部 4 2 に入力する（焦点距離校正工程）。

【0074】

以上の魚眼レンズ 2 2 に対して実施する方法と同様にして、魚眼レンズ 2 3 に対する画像中心 C_R 、及び、放射歪みパラメータ $k_{R,1}$ 、 $k_{R,3}$ 、 $k_{R,5}$ を算出する。そして、算出した画像中心 C_R ($x_{L,c}$, $y_{L,c}$) 及び放射歪みパラメータ $k_{R,1}$ 、 $k_{R,3}$ 、 $k_{R,5}$ をパラメータ格納部 4 2 に入力する。

【0075】

次に、撮像装置 1 0 A の両方の魚眼レンズ 2 2、2 3 の視野内に校正用チャート 5 0 が入ると共に、校正用チャート 5 0 の直線パターン 5 1 が水平になるように校正用チャート 5 0 を配置する。そして、異なる角度で 3 つ以上の校正用チャート 5 0 を撮像する。続いて、校正用チャート 5 0 を 9 0 度回転させ、直線パターン 5 1 の延在方向が鉛直方向になるよう校正用チャート 5 0 を配置する。そして、異なる角度で校正用チャート 5 0 を 3 つ以上撮像する（像取得工程）。

10

【0076】

続いて、画像変換部 4 3 は、校正された画像中心 O_L 、 O_R 及び焦点距離 f_L 、 f_R を利用して、3 つ以上取得された第 1 及び第 2 の被写体像 3 1、3 2 を第 1 及び第 2 の半球面画像に変換する。

【0077】

ここで、校正された焦点距離 f_L 、 f_R を利用することは、放射歪みパラメータ $k_{L,1}$ 、 $k_{L,3}$ 、 $k_{L,5}$ 及び $k_{R,1}$ 、 $k_{R,3}$ 、 $k_{R,5}$ を利用することに対応するので、その結果として、式 (25) で表される結像特性を利用することになる。

20

【0078】

そして、前述した第 1 消失点及び第 2 消失点を算出し、式 (29) 及び式 (30) を利用して R_{w1} を決定する。また、式 (31) 及び式 (32) を利用して R_{w2} を決定する。そして、式 (29) と式 (30)、又は、(式 31) と (式 32) より、 R_{1c_w} 及び R_{2c_w} に基づいて第 2 の画像座標系 S_R から第 1 の画像座標系 S_L への変換行列 R_{L_R} を算出して、算出された変換行列 R_{L_R} をパラメータ格納部 4 2 に入力する（相対姿勢情報校正工程）。

【0079】

上記校正方法では、3 つ以上の第 1 の被写体像 3 1 及び 3 つ以上の第 2 の被写体像 3 2 を利用して画像中心 O_L 、 O_R を校正しているため、画像中心 O_L 、 O_R をより正確に校正できている。

30

【0080】

更に、式 (24) で表される魚眼レンズ 2 2、2 3 の結像特性をテーラ展開し、低次の項から 3 項まで選択した式 (25) に基づいて焦点距離 f_L 、 f_R を校正している（言い換えれば、放射歪みパラメータ $k_{L,1}$ 、 $k_{L,3}$ 、 $k_{L,5}$ 、 $k_{R,1}$ 、 $k_{R,3}$ 、 $k_{R,5}$ を算出している）ので、球面視覚センサー 2 0 に対応した結像特性が得られることになり、結果として、放射歪みも校正できることになる。

【0081】

例えば、理論式としての式 (24) をそのまま利用して焦点距離 f_L 、 f_R を校正した場合には、放射歪みは校正できないが、上記のように、テーラ展開し、複数の項を選択してから焦点距離 f_L 、 f_R を校正することによって放射歪みもより確実に校正できる。

40

【0082】

また、3 つ以上の第 1 及び第 2 の被写体像 3 1、3 2 を利用して相対姿勢情報を校正しているため、画像中心 O_L 、 O_R の場合と同様により正確な相対姿勢情報としての変換行列 R_{L_R} を算出できている。

【0083】

以上のようにして校正された撮像系パラメータを有する撮像装置 1 0 A での球面画像形成方法について説明する。

【0084】

50

先ず、撮像装置 10 A が魚眼レンズ 22, 23 を利用して第 1 及び第 2 の被写体像 31, 32 を撮像すると、撮像素子 27 は、それらを電気信号に変換して第 1 の通信部 28 に入力する。第 1 の通信部 28 は、入力された画像情報に相当する画像データを例えば無線によって第 2 の通信部 41 に送信する。第 2 の通信部 41 は、受信した画像データを画像変換部 43 に入力する。

【0085】

この画像変換部 43 は、校正部 45 A によって校正された撮像系パラメータに基づいて第 1 及び第 2 の被写体像 31, 32 を第 1 及び第 2 の半球面画像に変換する。そして、画像形成部 44 は、画像変換部 43 で得られた第 1 及び第 2 の半球面画像のうち、第 2 の画像座標系 S_R で表されている第 2 の半球面画像を変換行列 $R_{L,R}$ によって第 1 の画像座標系 S_L に変換することで球面画像を形成する。

10

【0086】

上記撮像装置 10 A では、画角 180 度を有する 2 つの魚眼レンズ 22, 23 を利用して球面視覚センサー 20 を中心とした全天周の被写体を撮像しているので、同一時刻における被写体の球面画像を得ることができる。その結果として、動的な環境の撮像にも好適に利用することが可能である。また、像形成部 21 が有する魚眼レンズ 22, 23 は同一の視点を有するので、球面画像における、例えば、左半球と右半球の画像のズレが小さくなっている。

【0087】

そして、この球面画像は、校正部 45 A によって校正された撮像系パラメータにも基づいて形成されているので、より正確に被写体を表した画像となっている。そのため、撮像装置 10 A は、例えば、監視センサーや、移動ロボットなどの周辺認識システムに好適に利用できる。また、球面視覚センサー 20 を小型化することによって、胃カメラなどにも利用できる。

20

【0088】

(第 2 の実施形態)

本発明に係る撮像装置及び撮像系パラメータの校正方法の他の実施形態について説明する。図 10 に示すように、撮像装置 10 B は、画像形成手段 40 が、校正部 45 B を有する点で、図 3 に示した撮像装置 10 A と主に相違する。球面視覚センサー 20 の構成は、第 1 の実施形態の場合と同様であるため、説明を省略する。

30

【0089】

この校正部 45 B で撮像系パラメータを校正する方法について説明する。校正部 45 B は、CPU 等を有する画像形成手段 40 に予め記録されている所定のプログラムを実行することによって次に示す方法によって撮像系パラメータを校正する。本実施形態においても、像形成部 21 が有する魚眼レンズ 22, 23 の結像特性は、式 (25) で表されるものとする。先ず、魚眼レンズ 22, 23 の画像中心 O_L, O_R 及び焦点距離 f_L, f_R の校正について説明する。

【0090】

第 1 の実施形態の場合と同様に、校正前の第 1 の画像座標系 S_L での魚眼レンズ 22 の実際の (校正後の) 画像中心 C_L の位置座標を (x_L, c, y_L, c) とする。また、 $X_L Y_L$ 平面における第 1 の被写体像 31 内の点を $q(x_L, y_L)$ とする。この際、点 q に対応する第 1 の半球面画像 (又は球面画像) 上の点を m_q とすると、点 m_q は、式 (20) より、

40

【数 33】

$$m_q = [\sin \theta_L \cos \phi_L \quad \sin \theta_L \sin \phi_L \quad \cos \theta_L] \cdots (33)$$

と表される。

【0091】

50

校正後の画像中心 O_L としての点 C_L を原点とする第 1 の画像座標系 S_L における点 q の位置座標は $(x_L - x_{L,c}, y_L - y_{L,c})$ となる。また、式 (25) の逆関数をとすると、 θ_L は、

【数 34】

$$\theta_L = \eta(r_L; k_{L,1}, k_{L,3}, k_{L,5}) \cdots (34)$$

と表される。また、方位角 ϕ_L は、

【数 35】

$$\phi_L = \arctan(y_L - y_{L,c}, x_L - x_{L,c}) \cdots (35)$$

10

となるので、第 1 の被写体像 31 を第 1 の半球面画像に変換したときの点 q に対応する点 m_q の位置ベクトルは、式 (33)、式 (34) 及び式 (35) より、 $x_{L,c}$ 、 $y_{L,c}$ 及び $k_{L,1}$ 、 $k_{L,3}$ 、 $k_{L,5}$ (又は f_L) の関数となる。

【0092】

ところで、図 11 に示すように、実空間での直線パターン 51 は、球面画像上では大円の一部の円弧 52 として表される。なお、図 11 に示す直線パターン 51 は、図 7 に示した直線パターン 51 を模式的に表したものである。この円弧 52 を含む平面の法線単位ベ

20

【数 36】

$$n_L = [\sin \theta_{L_n} \cos \phi_{L_n} \quad \sin \theta_{L_n} \sin \phi_{L_n} \quad \cos \theta_{L_n}] \cdots (36)$$

と表される。ここで、 θ_{L_n} は、単位法線ベクトル n_L と Z_L 軸とのなす角度であり、 ϕ_{L_n} は、単位法線ベクトル n_L の $X_L Y_L$ 平面への投影線の X_L 軸からの方位角である。この単位法線ベクトル n_L は、円弧 52 上の任意の点 m_{q1} 、 m_{q2} の位置ベクトルの外積で決まるが、より正確に n_L を算出するために、以下の式 (37)

30

【数 37】

$$n_L = \frac{1}{l} \sum_{i=1}^l (m_{q1i} \times m_{q2i}) \cdots (37)$$

によって算出する。前述したように、円弧 52 上の点 m_q の位置を決める θ_L 、 ϕ_L は式 (34) 及び式 (35) よりそれぞれ、 $x_{L,c}$ 、 $y_{L,c}$ 及び $k_{L,1}$ 、 $k_{L,3}$ 、 $k_{L,5}$ (又は、 f_L) の関数であるため、 θ_{L_n} 及び ϕ_{L_n} も同様にそれらの関数である。

40

【0093】

この単位法線ベクトル n_L と、式 (33) より、円弧 52 を含む平面の方程式は、

【数 38】

$$m_q \cdot n_L = \sin \theta_{L_n} \cos \phi_{L_n} \sin \theta_L \cos \phi_L \\ + \sin \theta_{L_n} \sin \phi_{L_n} \sin \theta_L \sin \phi_L + \cos \theta_{L_n} \cos \theta_L = 0 \cdots (38)$$

となる。そこで、撮像された直線パターン 51 の数を F とし、円弧 52 上の点の数を P_1 とし、評価関数 1_L を、

【数 3 9】

$$\xi 1_L = \sum_{l=1}^F \sum_{p=1}^{P_l} (\sin \theta_{Ln,l} \cos \phi_{Ln,l} \sin \theta_{L,pl} \cos \phi_{L,pl} + \sin \theta_{Ln,l} \sin \phi_{Ln,l} \sin \theta_{L,pl} \sin \phi_{L,pl} + \cos \theta_{Ln,l} \cos \theta_{L,pl})^2 \cdots (39)$$

とする。そして、この評価関数 $\xi 1_L$ を最小にすることによって魚眼レンズ 2 2, 2 3 の内部パラメータとしての画像中心 O_L , 放射歪みパラメータ $k_{L,1}, k_{L,3}, k_{L,5}$ (言い換えれば、焦点距離 f_L) をより正確に得ることができる。魚眼レンズ 2 3 を校正する方法も同様であるので、説明は省略する。 10

【0 0 9 4】

次に、第 1 及び第 2 の画像座標系 S_L, S_R の相対姿勢情報の校正について説明する。

【0 0 9 5】

図 1 2 に示すように、2 つの魚眼レンズ 2 2, 2 3 の視野に含まれる実空間での直線パターン 5 1 を撮像装置 1 0 B によって撮像する。そして、そのようにして得られた直線パターン 5 1 の第 1 及び第 2 の半球面画像としての円弧 5 2 を含む平面の単位法線ベクトル n_L, n_R を算出する。この単位法線ベクトル n_L, n_R は、式 (3 7) と同様にして算出してもよいが、次のようにすることも可能である。すなわち、前述したように直線パターン 5 1 の投影像は、式 (3 8) を満たす平面に含まれるが、この平面は、 20

【数 4 0】

$$ax + by + cz = 0 \cdots (40)$$

とも表される。ただし、 a, b, c は、 $a^2 + b^2 + c^2$ が 1 という条件を満たす数である。

【0 0 9 6】

円弧 5 2 上の点 m_q から平面 (a, b, c) への距離 t は、 $a b c (a x + b y + c z)$ となるので、単位法線ベクトル n_L は、評価関数 2 30

【数 4 1】

$$\Gamma 2 = \sum_{i=1}^n (ax_i + by_i + cz_i) \cdots (41)$$

を最小にすることで求めることができる。

【0 0 9 7】

なお、単位法線ベクトル $n_L (n_R)$ としては、反対方向 (すなわち、符合の異なる) を有する 2 つのものが算出されることになるが、それらの内積を取って評価することで、 n_L 及び n_R が同じ方向を向いているものを選択できる。 40

【0 0 9 8】

ところで、単位法線ベクトル n_L, n_R は、同時に撮像された直線パターン 5 1 の像を含む平面に対するものであるので、第 1 及び第 2 の画像座標系 S_L, S_R が一致していれば同じになるはずである。そのため、第 1 の画像座標系 S_L と第 2 の画像座標系 S_R の相対姿勢情報としての変換行列 R_{LR} によって、

【数 4 2】

$$n_L = R_{LR} n_R \cdots (42)$$

が成り立つことになる。従って、評価関数 2 50

【数 4 3】

$$\xi 2 = \sum_{i=1}^n \left(n_{L,i} - R_{LR} n_{R,i} \right)^2 \cdots (43)$$

を最小にすることで R_{LR} を求めることができる。なお、式 (43) において、 $n_{L,i}$ 及び $n_{R,i}$ は、複数の直線パターン 51 の投影像としての円弧 52 を含む単位法線ベクトルをそれぞれ表している。

【0099】

次に、上記方法に基づいて撮像装置 10B による撮像系パラメータの校正方法をより具体的に説明する。まず、魚眼レンズ 22, 23 の画像中心 O_L, O_R 及び焦点距離 f_L, f_R を校正する。図 7 に示した、直線パターン 51 を含む校正用チャート 50 を用意してそれを魚眼レンズ 22 の視野内に配置した後に撮像装置 10B で撮像する (像取得工程)。

【0100】

画像変換部 43 は、取得された第 1 の被写体像 31 から、校正前の (換言すれば、設計値としての) 画像中心 O_L 及び焦点距離 f_L に基づいて第 1 の半球面画像を形成する (第 1 の画像変換工程)。校正部 45B は、画像変換部 43 で形成された第 1 の半球面画像内の点 q を式 (34) 及び式 (35) を利用して校正後の画像中心 $C_L (x_L, c, y_L, c)$ 及び $k_{L,1}, k_{L,3}, k_{L,5}$ (又は f_L) の関数に変換する。

【0101】

次いで、そのようにして変換された直線パターン 51 の投影像としての円弧 52 を含む平面の法線ベクトル n_L を式 (37) を利用して算出する。この単位法線ベクトル n_L を算出するまでの工程を F 個の直線パターン 51 に対して繰り返す。なお、 F 個の直線パターン 51 の投影像を得るためには、1 つの直線パターン 51 を含んだ校正用チャートを F 回撮像してもよいし、図 7 に示したように複数の直線パターン 51 を含んだ校正用チャート 50 を直線パターン 51 の総計が F 個になるように撮像してもよい。

【0102】

そして、校正部 45B は、式 (39) に示した評価関数 1_L を設定して、例えば、ラグランジュ未定乗数法によって $x_L, c, y_L, c, k_{L,1}, k_{L,3}, k_{L,5}$ を決定する。そして、その結果を、パラメータ格納部 42 に格納することで、画像中心 O_L 及び焦点距離 f_L を校正する (内部パラメータ校正工程)。魚眼レンズ 23 の校正方法は魚眼レンズ 22 の場合と同様であるので、説明は省略する。

【0103】

次に、校正用チャート 50 を両方の魚眼レンズ 22, 23 の視野内に配置して撮像装置 10B を回転させながら校正用チャート 50 を撮像する (像取得工程)。これにより、複数の直線パターン 51 の第 1 及び第 2 の被写体像 31, 32 を得ることができる。画像変換部 43 は、校正された画像中心 O_L, O_R 及び焦点距離 f_L, f_R に基づいて第 1 及び第 2 の被写体像 31, 32 を第 1 及び第 2 の半球面画像に変換する (第 2 の画像変換工程)。

【0104】

続いて、校正部 45B は、第 1 及び第 2 の半球面画像に含まれる直線パターン 51 の投影像としての円弧 52 を含む平面の単位法線ベクトル n_L, n_R を、式 (41) 又は式 (37) によって算出する。更に、校正部 45B は、式 (39) に示す評価関数 2 を設定して、評価関数 2 を最小にする変換行列 R_{LR} を決定することで、相対姿勢情報を校正する (相対姿勢情報校正工程)。

【0105】

上記校正方法では、画像中心 O_L 及び焦点距離 f_L が同時に校正され、また、画像中心 O_L 及び焦点距離 f_L が同時に校正されるので、校正時間をより短くすることができる。また、直線パターン 51 の像としての円弧 52 を利用しているため、像形成部 21 を構成

している魚眼レンズ 22, 23 のように画角が 180 度で互いの視野に重なりがない場合でも確実に校正を実施することが可能である。

【0106】

以上のようにして、校正された撮像系パラメータを利用して撮像装置 10B によって球面画像を形成する方法は、撮像装置 10A の場合と同様である。そして、球面視覚センサー 20 の構成も第 1 の実施形態の場合と同様であるので、同じ効果を有する。すなわち、同一時刻における被写体の球面画像を得ることができ、その結果として、動的な環境の撮像にも好適に利用することが可能である。また、魚眼レンズ 22, 23 は同一の視点を有するので、球面画像における、例えば、左半球と右半球の画像のズレが小さくなっている。撮像装置 10B は、例えば、監視センサーや、移動ロボットなどの周辺認識システムに好適に利用でき、球面視覚センサー 20 を小型化することによって、胃カメラなどにも利用できることも撮像装置 10A の場合と同様である。

10

【0107】

(第 3 の実施形態)

本発明に係る撮像装置及び撮像系パラメータの校正方法の更に他の実施形態について説明する。図 13 に示すように、撮像装置 10C は、画像形成手段 40 が、3次元物体に含まれている特徴点 M_c を利用して撮像系パラメータを校正する校正部 45C を有する点で、図 3 に示した撮像装置 10A と主に相違する。球面視覚センサー 20 の構成は、第 1 の実施形態の場合と同様であるため、説明は省略する。

【0108】

先ず、校正部 45C によって撮像系パラメータを校正する方法について説明する。校正部 45C は、CPU 等を有する画像形成手段 40 に予め記録されている所定のプログラムを実行することによって次に示す方法によって撮像系パラメータを校正する。本実施形態においても、像形成部 21 が有する魚眼レンズ 22, 23 の結像特性は、式 (25) で表されるものとする。先ず、魚眼レンズ 22, 23 の画像中心 O_L, O_R 及び焦点距離 f_L, f_R の校正について説明する。

20

【0109】

図 14 に示すように、球面視覚センサー 20 が、校正用ボックス 60 内に支持棒 61 などによって支持されて配置されているとする。校正用ボックス 60 には、複数の特徴点 M_c が格子状に配列されている。図 14 において、ハッチング部分が特徴点 M_c 及び球面視覚センサー 20 を表している。また、球面視覚センサー 20 を中心とする座標系と魚眼レンズ 22 のカメラ座標系 (すなわち、第 1 の画像座標系 S_L) とは同じとする。これは、第 2 の画像座標系 S_R 上の点を変換行列 $R_{L,R}$ を利用して第 1 の画像座標系 S_L に移動することに相当する。

30

【0110】

ここで、撮像装置 10C によって形成される球面画像上の点の位置ベクトルを m 、

【数 44】

$$m = [u \quad v \quad s]^T \cdots (44)$$

40

とする。前述したように、球面画像は、第 1 の被写体像 31 から変換された第 1 の半球面画像と、第 2 の被写体像 32 から変換された第 2 の半球面画像とを結合したものである。より具体的には、球面画像は、第 2 の画像座標系 S_R で表される第 2 の半球面画像が変換行列 $R_{L,R}$ で第 1 の画像座標系 S_L 上に変換されて構成されている。したがって、点 m が球面画像における第 1 の半球面画像上の点 m_L であるとき、 m は m_L に一致する。また、点 m が球面画像における第 2 の半球面画像に対応する点 m_R であるとき、 m は $R_{L,R} m_R$ に一致する。 m_L, m_R は、式 (20) を参照すると、それぞれ

【数 4 5】

$$m_L = [\sin \theta_L \cos \phi_L \quad \sin \theta_L \sin \phi_L \quad \cos \theta_L]^T \cdots (45)$$

【数 4 6】

$$m_R = [\sin \theta_R \cos \phi_R \quad \sin \theta_R \sin \phi_R \quad \cos \theta_R]^T \cdots (46)$$

10

と表される。

【0 1 1 1】

ここで、第 1 の実施形態の場合と同様に、校正後の魚眼レンズ 2 2 の画像中心 O_L の座標を $C_L (x_{L,c}, y_{L,c})$ とし、校正後の魚眼レンズ 2 3 の画像中心 O_R の座標を $C_R (x_{R,c}, y_{R,c})$ とし、式 (25) の逆関数を とすると、式 (34) が成り立つ。以上のことから u, v, s は、 $x_{L,c}, y_{L,c}, k_{L,1}, k_{L,3}, k_{L,5}$ の関数か、又は、 $x_{R,c}, y_{R,c}, k_{R,1}, k_{R,3}, k_{R,5}$ の関数になる。

【0 1 1 2】

また、球面画像上の点 m に対応する実空間での特徴点 M_c の第 1 の画像座標系 S_L 上の位置ベクトルを、

20

【数 4 7】

$$M_c = [X_c \quad Y_c \quad Z_c]^T \cdots (47)$$

とする。そして、図 15 に示すように、回転行列 R 及び並進行列 T によって第 1 の画像座標系 S_L に変換できる 3 次元座標系を世界座標系 S_w とする。回転行列 R は、 j_1, j_2, j_3 をベクトルとしたとき、

【数 4 8】

$$R = [j_1 \quad j_2 \quad j_3]^T \cdots (48)$$

30

であり、並進行列 T は、

【数 4 9】

$$T = [t_1 \quad t_2 \quad t_3]^T \cdots (49)$$

である。このとき、 N_w を、 $[X_w, Y_w, Z_w, 1]$ とすると、

40

【数 5 0】

$$M_c = [R \quad T] N_w \cdots (50)$$

が成り立つ。

【0 1 1 3】

また、球面画像上の点の位置ベクトルを m とし、 $\sqrt{x^2 + y^2 + z^2}$ を $(x^2 + y^2 + z^2)^{1/2}$ とすると、

【数 5 1】

$$m = \frac{1}{\rho} [X_c \ Y_c \ Z_c]^T = \frac{1}{\rho} M_c \cdots (51)$$

が成り立つ。これは、特徴点 M_c が球面視覚センサー 20 よりも十分遠くに位置していれば、位置ベクトル m と位置ベクトル M_c とがほぼ一致することを示している。従って、式 (51) より、

【数 5 2】

$$m = [R \ T] N_w \cdots (52)$$

10

となる。これにより、以下の 2 つの方程式が得られる。

【数 5 3】

$$s_i j_1^T M_{wi} - u_i j_3^T M_{wi} + s_i t_x - u_i t_z = 0 \cdots (53)$$

【数 5 4】

$$s_i j_2^T M_{wi} - v_i j_3^T M_{wi} + s_i t_y - v_i t_z = 0 \cdots (54)$$

20

式 (53) 及び式 (54) において、 M_{wi} は、世界座標系 S_w での i 番目の特徴点 M_c の座標である。

【0114】

u 、 v 、 s は、点 m の位置に応じて、すなわち、魚眼レンズ 22 によって撮像された点が、魚眼レンズ 23 によって撮像された点かに応じて $x_{L,c}$ 、 $y_{L,c}$ 、 $k_{L,1}$ 、 $k_{L,3}$ 、 $k_{L,5}$ の関数か、又は、 $x_{R,c}$ 、 $y_{R,c}$ 、 $k_{R,1}$ 、 $k_{R,3}$ 、 $k_{R,5}$ であることから、式 (53) 及び式 (54) には、 $\{x_{L,c}$ 、 $y_{L,c}$ 、 $k_{L,1}$ 、 $k_{L,3}$ 、 $k_{L,5}$ 、 $x_{R,c}$ 、 $y_{R,c}$ 、 $k_{R,1}$ 、 $k_{R,3}$ 、 $k_{R,5}$ 、 R_{LR} 、 R 、 $T\}$ が含まれており、結果として、19 個の未知数が含まれることになる。

30

【0115】

しかしながら、撮像する特徴点 M_c の数を増やすことによって、この未知数の数 (ここでは、19 個) よりも多くの方程式を得ることができるので、未知数を決定できる。そこで、評価関数 C を

【数 5 5】

$$C = \sum_{i=1}^n (s_i j_1^T M_{wi} - u_i j_3^T M_{wi} + s_i t_x - u_i t_z)^2 + \sum_{i=1}^n (s_i j_2^T M_{wi} - v_i j_3^T M_{wi} + s_i t_y - v_i t_z)^2 \cdots (55)$$

40

と設定し、式 (55) を最小にするように上記の未知数を決定することで各パラメータを校正することができる。

【0116】

次に、上記方法を利用して撮像装置 10C において撮像系パラメータを校正する方法をより具体的に説明する。

50

【0117】

まず、球面視覚センサー20より十分大きい校正用ボックス60を用意する。この校正用ボックス60としては、例えば、立方体の箱の内面に特徴点としてのLEDを格子状に配置したものが考えられる。この校正用ボックス60内に球面視覚センサー20を支持棒61などによって配置し、球面視覚センサー20によって特徴点 M_c を撮像する（像取得工程）。これによって、第1及び第2の被写体像31, 32には、特徴点 M_c に対応する像が形成されることになる。

【0118】

そして、画像変換部43は、取得された第1及び第2の被写体像31, 32から、校正前の（換言すれば、校正前の）画像中心 O_L, O_R 及び焦点距離 f_L, f_R に基づいて第1及び第2の半球面画像を形成する（画像変換工程）。ここで、校正部45Cは、画像変換部43で形成された第1の半球面画像内の点 m_L を式(34)及び式(35)を利用して校正後の画像中心 $C_L(x_{L,c}, y_{L,c})$ 、放射歪みパラメータ $k_{L,1}, k_{L,3}, k_{L,5}$ の関数に変換する。また、第2の半球面画像内の点 m_R を校正後の画像中心 $C_R(x_{R,c}, y_{R,c})$ 、及び、放射歪みパラメータ $k_{R,1}, k_{R,3}, k_{R,5}$ の関数に変換する。

10

【0119】

次いで、そのようにして変換された第1及び第2の半球面画像に対して、画像形成部44は、変換行列 R_{LR} を利用して第2の半球面画像を第1の画像座標系 S_L で表すことによって球面画像を形成する（画像形成工程）。

20

【0120】

このように球面画像が形成されると、言い換えれば、第1の画像座標系 S_L において、第1及び第2の半球面画像が一緒に表されると、校正部45Cは、式(55)に示した評価関数 C を設定して、例えば、ラグランジュ未定乗数法によって、評価関数 C を最小にする $\{x_{L,c}, y_{L,c}, k_{L,1}, k_{L,3}, k_{L,5}, x_{R,c}, y_{R,c}, k_{R,1}, k_{R,3}, k_{R,5}, R_{LR}\}$ を決定する。

【0121】

この際、上記の未知数は、魚眼レンズ22に関する未知数 $\{x_{L,c}, y_{L,c}, k_{L,1}, k_{L,3}, k_{L,5}\}$ と魚眼レンズ23に関する未知数 $\{x_{R,c}, y_{R,c}, k_{R,1}, k_{R,3}, k_{R,5}\}$ と変換行列 R_{LR} に分けられるので、まず、魚眼レンズ22, 23に関するパラメータを決定したのち、変換行列 R_{LR} を決定してもよい。

30

【0122】

そして、校正部45Cは、算出された $\{x_{L,c}, y_{L,c}, k_{L,1}, k_{L,3}, k_{L,5}, x_{R,c}, y_{R,c}, k_{R,1}, k_{R,3}, k_{R,5}, R_{LR}\}$ をパラメータ格納部42に入力する。これによって、画像中心 O_L, O_R 及び焦点距離 f_L, f_R 及び相対姿勢情報としての変換行列 R_{LR} が校正されることになる（校正工程）。

【0123】

上記校正方法では、校正用ボックス60を1回撮像することによって、画像中心 O_L, O_R 、焦点距離 f_L, f_R 及び相対姿勢情報が校正されることから、校正時間をより短くすることができる。また、3次元状に配列された特徴点 M_c を利用しているため、球面視覚センサー20を構成している魚眼レンズ22, 23のように画角が180度で互いの視野に重なりがない場合でも確実に構成することが可能である。

40

【0124】

また、例えば、従来の校正方法のように、いわゆる中心射影モデルによって校正する場合、3次元状に配列された特徴点を同様に扱えない、言い換えれば、全ての特徴点に対して同じ式を適用することができない。しかしながら、前述した球面視覚センサー20の撮像系パラメータを校正する方法では、球面画像を利用して校正する（すなわち、球面射影モデルによって校正する）ため、全天周に位置する特徴点 M_c を同様に扱うことができる。したがって、全ての特徴点 M_c に対して同じ評価関数 C を適用することで撮像系パラメータを校正できる。その結果として、校正が容易であると共に、同じ式を利用するのよ

50

り正確に校正できる。

【0125】

以上のようにして、校正された撮像系パラメータを利用して撮像装置10Cによって球面画像を形成する方法は、撮像装置10Aの場合と同様である。そして、球面視覚センサー20の構成も第1の実施形態の場合と同様であるので、同じ効果を有する。

【0126】

すなわち、同一時刻における被写体の球面画像を得ることができ、その結果として、動的な環境の撮像にも好適に利用することが可能である。また、魚眼レンズ22, 23は同一の視点を有するので、球面画像における、例えば、左半球と右半球の画像のズレが小さくなっている。

【0127】

そして、撮像装置10Cは、例えば、監視センサーや、移動ロボットなどの周辺認識システムに好適に利用でき、球面視覚センサー20を小型化することによって、胃カメラなどにも利用できることも撮像装置10Aの場合と同様である。

【0128】

以上、本発明に好適な実施形態について説明したが、本発明は上記実施形態に限定されない。例えば、図16に示すような撮像装置10Dの構成にしてもよい。撮像装置10Dが有する球面視覚センサー80は、一对の魚眼レンズ22, 23からなる像形成部21の外側に撮像手段26が配置されている点で、球面視覚センサー20の構成と相違する。

【0129】

撮像手段26は、例えば、魚眼レンズ22, 23の第1及び第2の湾曲面22a, 23aに固定された断面が台形状の収容部81内に配置されていればよい。像形成部21の外側は光を通すので、このような構成でも確実に第1及び第2の被写体像31, 32を取得することが可能である。また、このように収容部81を設けることで、例えば、球面視覚センサー80を移動ロボットなどに容易に取り付けられることになる。

【0130】

また、撮像手段26は、第1の通信部28を有するとしたが、例えば、図16に示した撮像装置10Dの構成の場合には、撮像手段26には第1の通信部28を設けなくてもよい。その場合には、撮像素子27と画像形成手段40とを、例えば、電氣的に接続することが考えられる。

【0131】

更に、像形成部21の形状は球状としたが、像形成部21は、断面が楕円形状になってもよい。更にまた、第1及び第2の実施形態で説明した撮像系パラメータの構成方法は、図17に示すように、互いに離れた2つの魚眼レンズ91, 92から構成される撮像装置10Eに対しても適用できる。撮像装置10Eの構成では、全天周球面画像を得るため、第1及び第2の結像手段としての魚眼レンズ91, 92の画角 w は、185度程度有ることが好ましい。

【0132】

更にまた、第1～第3の実施形態では、魚眼レンズ22, 23の結像特性は、式(21)で表されるとしたが、式(24)で表される結像特性を有すればよい。

【0133】

また、第1の実施形態において説明した撮像系パラメータの校正方法においては、式(26)～式(28)を利用して焦点距離 f_L , f_R を校正した、言い換えれば、放射歪みパラメータ k_I を算出したが、焦点距離 f_L , f_R は式(21)を利用して次のようにして校正してもよい。

【0134】

先ず、魚眼レンズ22の焦点距離 f_L の校正方法について説明する。ここでは、校正部45Aは、画像中心 O_I を校正したものとして説明する。画像中心 O_I からの消失点 V_1 , V_2 までの距離 $r_{L,1}$, $r_{L,2}$ は、式(21)を利用すると、

10

20

30

40

【数 5 6】

$$r_{L,1} = 2f_L \sin\left(\frac{\theta_{L,1}}{2}\right) \cdot \cdot \cdot \quad (56)$$

【数 5 7】

$$r_{L,2} = 2f_L \sin\left(\frac{\theta_{L,2}}{2}\right) \cdot \cdot \cdot \quad (57)$$

10

が成り立つ。なお、画像中心 O_I は校正されているので、 $r_{L,1}$ 及び $r_{L,2}$ は、校正された画像中心 O_I からの消失点 V_1, V_2 までの距離である。そして、 $r_{L,1}$ 及び $r_{L,2}$ に対しては、式 (28) が成り立つ。

【0135】

$r_{L,1}$ 及び $r_{L,2}$ は、撮像素子 27 の受光面 27a 上の点の位置 (対応する画素の位置) で決まるので、式 (56)、式 (57) 及び式 (28) より、焦点距離 f_L を決定することができる。すなわち、校正部 45A は、魚眼レンズ 22 の校正された画像中心 O_L と、その画像中心 O_L からの消失点 V_1, V_2 までの距離とによって焦点距離 f_L を校正する。魚眼レンズ 23 の焦点距離 f_R についても同様にして校正できるので、焦点距離 f_R の校正方法については説明は省略する。このようにして校正された画像中心 O_I 及び焦点距離 f_I に基づいて相対姿勢情報としての変換行列 $R_L R$ を算出する方法は、第 1 の実施形態で説明した通りである。

20

【0136】

画像中心 O_I 及び画像中心 O_L からの消失点 V_1, V_2 までの距離とに焦点距離 f_I を校正する方法の場合も、 r_I が $f_I \sin(\theta_I)$ で表される等距離射影方式や、 r_I が $f_I \sin(\theta_I)$ で表される正射影方式や、 r_I が $2f_I \tan(\theta_I/2)$ で表されるステレオ射影方式に対しても適用できる。

【0137】

また、更に、第 3 の実施形態において校正用ボックス 60 は、立方体の内面に LED を 3 次元状に配列したものを例示したが、例えば、図 18 に示すような校正用ボックス 100 でもよい。図 18 では、説明のために立方体としての校正用ボックス 100 の半分 (3 面で構成される部分) を示している。図 18 では、校正用ボックス 100 の内面は、黒と白の市松模様になっている。この場合、黒及び白の正方形の角を特徴点とすることができる。

30

【産業上の利用可能性】

【0138】

本発明に係る撮像装置は、例えば、警備システムでの監視センサーや、移動ロボットや製造ロボットの周辺認識装置に好適に利用することができる。更に、発掘現場や災害箇所などの狭隘箇所での撮影システムとしての利用も考えられる。更にまた、胃カメラやカプセル型の内視鏡としても利用可能である。そして、本発明に係る撮像系パラメータの校正方法は、上記のように利用する撮像装置の校正に好適に適用できる。

40

【図面の簡単な説明】

【0139】

【図 1】本発明に係る撮像装置で形成される球面画像を示す模式図である。

【図 2】魚眼レンズの結像特性を示す模式図である。

【図 3】本発明に係る撮像装置の一実施形態の構成の概略を示す概略構成図である。

【図 4】撮像手段によって取得される第 1 及び第 2 の被写体像の模式図である。

【図 5】第 1 及び第 2 の画像座標系を示す模式図である。

50

【図 6】 一对の消失点を含む第 1 の被写体像の模式図である。

【図 7】 直線パターンを含む校正用チャートの構成を示す概略構成図である。

【図 8】 異なる角度で撮像された直線パターンの第 1 の被写体像の図である。

【図 9】 撮像装置を回転させながら撮像された直線パターンの第 1 の被写体像の図である

。

【図 10】 本発明に係る撮像装置の他の実施形態の構成の概略を示す概略構成図である。

【図 11】 実空間での直線パターンの球面画像における投影像を示す模式図である。

【図 12】 一对の魚眼レンズの視野内に配置された直線パターンの球面画像における投影像を示す模式図である。

【図 13】 本発明に係る撮像装置の更に他の実施形態の構成の概略を示す概略構成図である。 10

【図 14】 校正用ボックスの構成を示す模式図である。

【図 15】 第 1 の画像座標系と世界座標系との位置関係を示す模式図である。

【図 16】 本発明に係る撮像装置の更に他の実施形態の構成の概略を示す概略構成図である。

【図 17】 本発明に係る撮像系パラメータの校正方法を適用可能な撮像装置の他の形態の構成を示す概略構成図である。

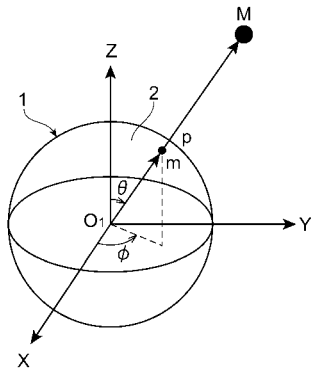
【図 18】 校正用ボックスの構成の一例の構成を示す図である。

【符号の説明】

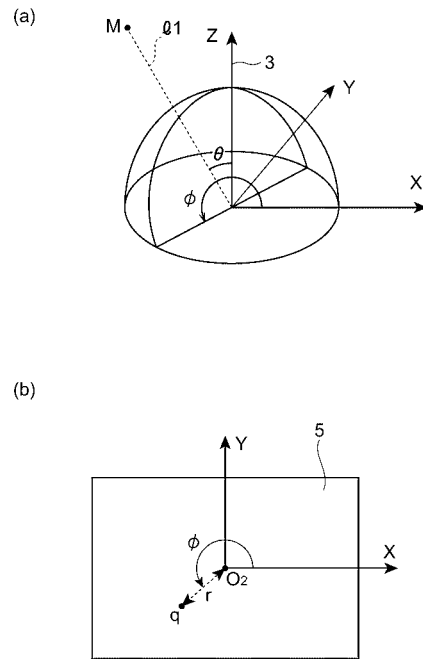
【0140】

3 ... 光軸、5 ... 像面、10A、10B、10C、10D、10E ... 撮像装置、21 ... 像形成部、22、91 ... 魚眼レンズ（第 1 の結像手段）、23、92 ... 魚眼レンズ（第 2 の結像手段）、22a ... 第 1 の湾曲面、22b ... 第 1 の結像手段の中心線、23a ... 第 2 の湾曲面、23b ... 第 2 の結像手段の中心線、24 ... 像形成部の中心部、25 ... 光路変更素子、26 ... 撮像手段、31 ... 第 1 の被写体像、32 ... 第 2 の被写体像、40 ... 画像形成手段、51 ... 直線パターン。 20

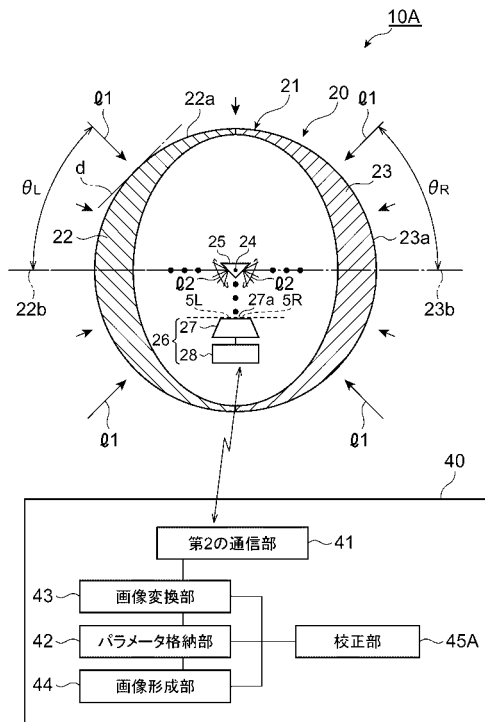
【 図 1 】



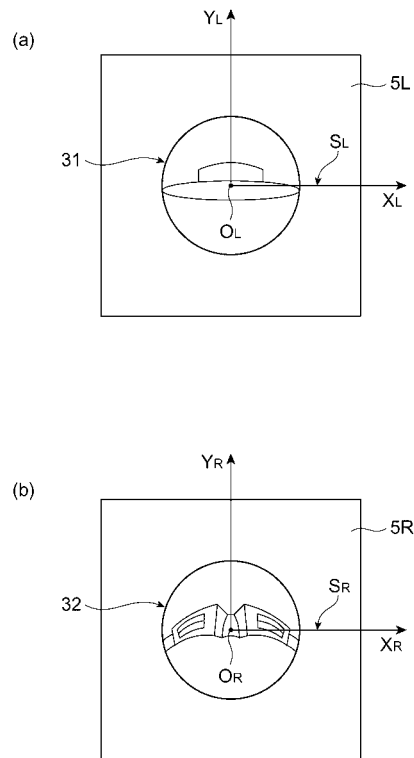
【 図 2 】



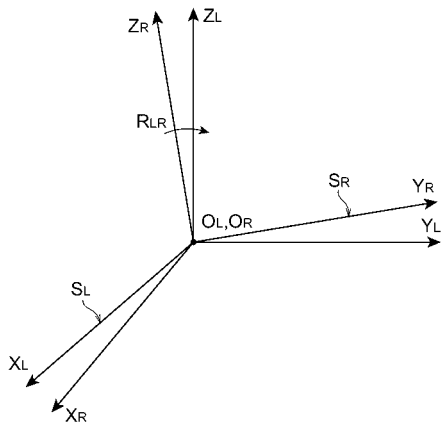
【 図 3 】



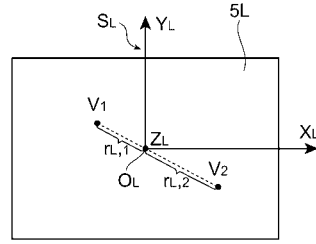
【 図 4 】



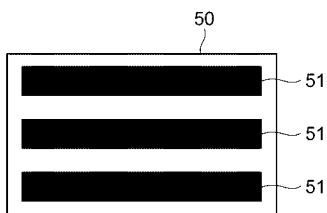
【 図 5 】



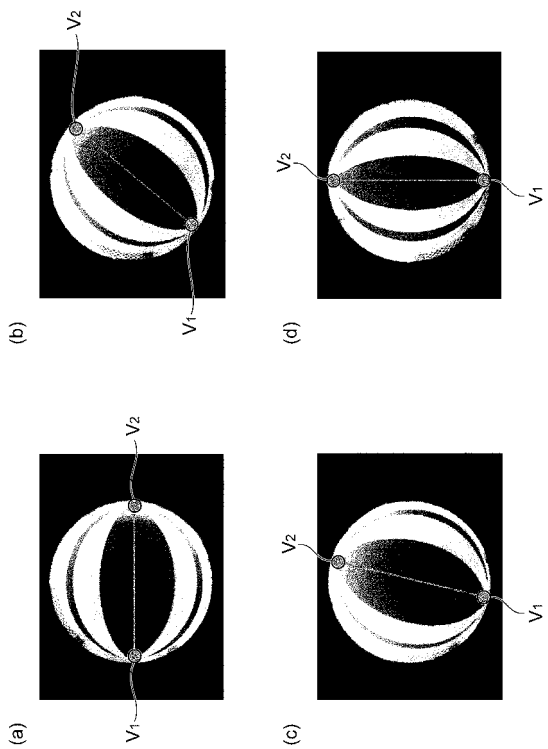
【 図 6 】



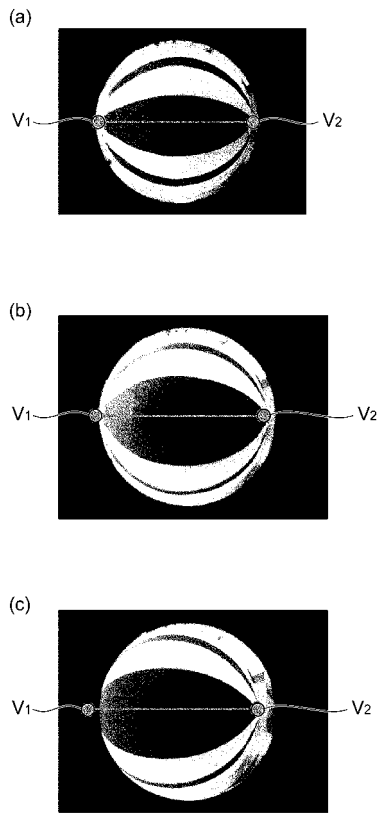
【 図 7 】



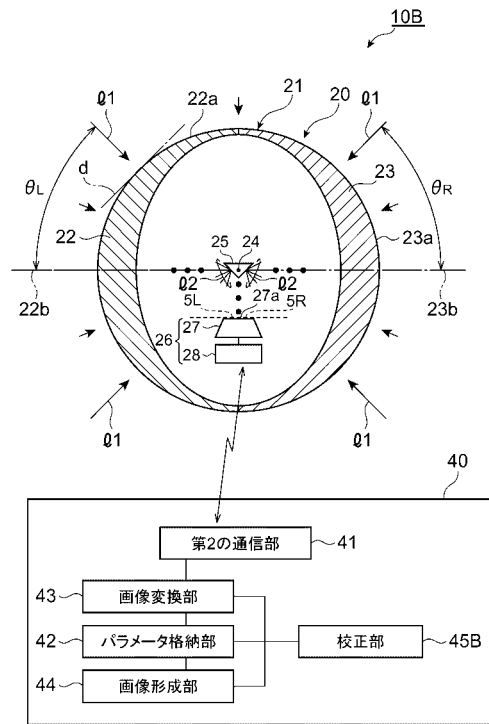
【 図 8 】



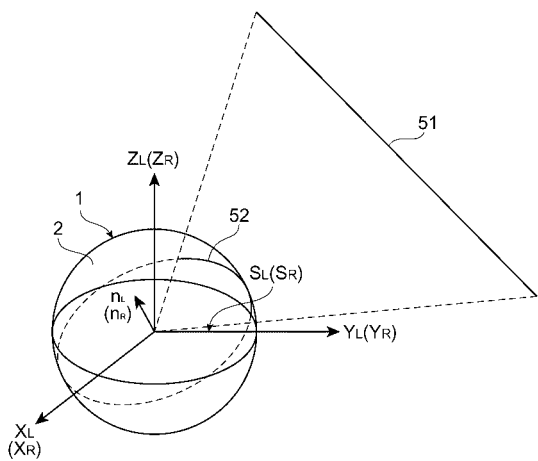
【 図 9 】



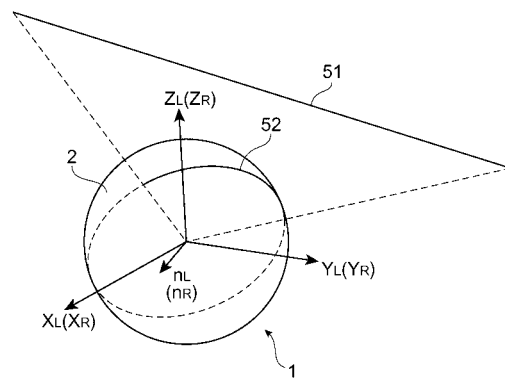
【 図 10 】



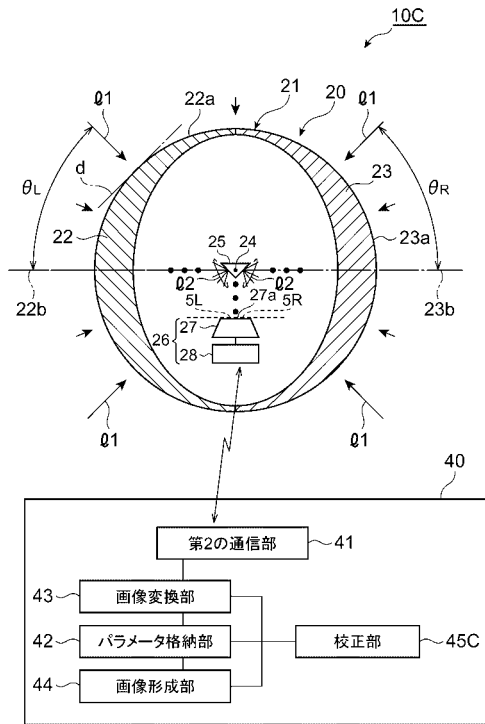
【 図 11 】



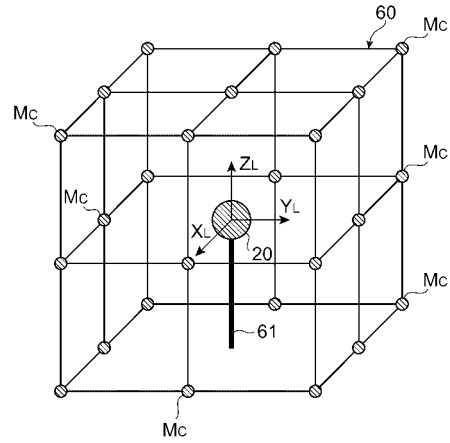
【 図 12 】



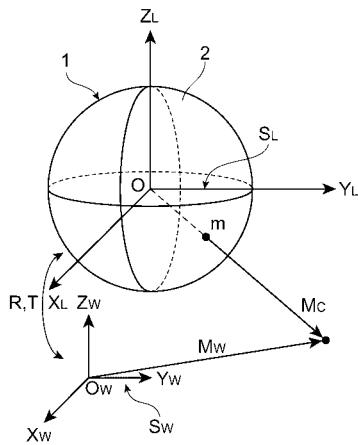
【 図 1 3 】



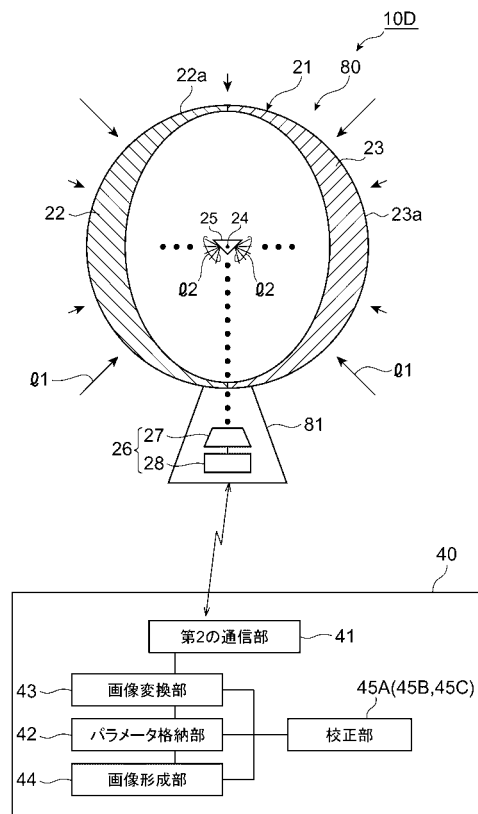
【 図 1 4 】



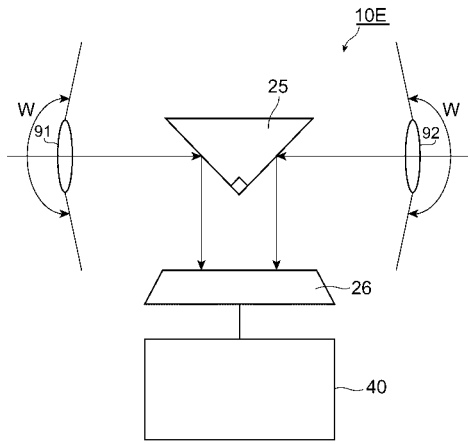
【 図 1 5 】



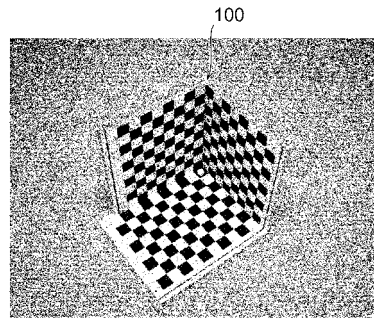
【 図 1 6 】



【 図 1 7 】



【 図 1 8 】



フロントページの続き

(51) Int.Cl.

F I

テーマコード(参考)

H 0 4 N 5/232

Z

Fターム(参考) 5C122 DA01 EA68 FA03 FB03 FB12 FH04 FH05 FH06 HA73 HB05
HB06