

(19) 日本国特許庁 (JP)

(12) 公表特許公報 (A)

(11) 特許出願公表番号

特表2016-531281

(P2016-531281A)

(43) 公表日 平成28年10月6日 (2016.10.6)

(51) Int. Cl.	F I	テーマコード (参考)
GO 1 S 7/497 (2006.01)	GO 1 S 7/497	2 F 1 1 2
HO 4 N 5/225 (2006.01)	HO 4 N 5/225 F	4 C 1 6 1
GO 1 C 3/00 (2006.01)	GO 1 C 3/00 1 2 0	5 C 0 6 1
HO 4 N 17/00 (2006.01)	HO 4 N 17/00 2 0 0	5 C 1 2 2
A 6 1 B 1/04 (2006.01)	A 6 1 B 1/04 3 7 0	5 J 0 8 4
審査請求 未請求 予備審査請求 未請求 (全 46 頁) 最終頁に続く		

(21) 出願番号 特願2016-522146 (P2016-522146)
 (86) (22) 出願日 平成26年7月2日 (2014.7.2)
 (85) 翻訳文提出日 平成28年2月24日 (2016.2.24)
 (86) 国際出願番号 PCT/CA2014/000534
 (87) 国際公開番号 WO2015/000056
 (87) 国際公開日 平成27年1月8日 (2015.1.8)
 (31) 優先権主張番号 2819956
 (32) 優先日 平成25年7月2日 (2013.7.2)
 (33) 優先権主張国 カナダ (CA)

(71) 出願人 516002934
 ガイ マーティン
 カナダ国、エイチ2エス 2エム5 ケベック州、モントリオール、リュ シャトーブリアン 6277
 (74) 代理人 100088672
 弁理士 吉竹 英俊
 (74) 代理人 100088845
 弁理士 有田 貴弘
 (72) 発明者 ガイ マーティン
 カナダ国、エイチ2エス 2エム5 ケベック州、モントリオール、リュ シャトーブリアン 6277
 Fターム (参考) 2F112 AC06 AD01 BA06 CA12 DA05
 DA32 FA03 FA21 FA23 FA45
 最終頁に続く

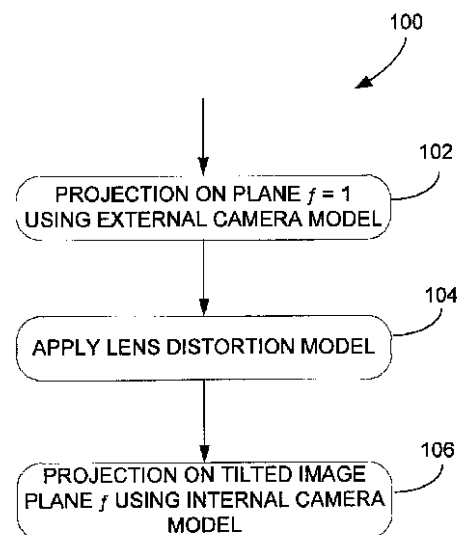
(54) 【発明の名称】 撮像装置のモデリングおよび校正のためのシステムおよびその方法

(57) 【要約】

【課題】

【解決手段】この発明は、カメラのモデリングおよび校正を行うシステムおよび方法に関するものであり、カメラ面に対する視軸の線の直角性における不完全性を補償するための新たな変数の組を使用しており、幾何学的および色彩的なレンズ収差に起因した画像の曲がりや原因となっている歪みを測定する際の精度を向上させるものであり、そこではカメラ画像面がフル3Dの透視投影から表現される。

【選択図】図8a



【特許請求の範囲】

【請求項 1】

校正と補正とを行う際に撮像装置をモデリングするために使用される、コンピュータによって実現される方法であって、前記方法は以下のものを備える：

前記撮像装置の焦点に原点を有する第 1 の 3 D 直交座標系を定義すること、ただし、前記第 1 の座標系の第 1 軸は、前記撮像装置の視線の方向に沿って伸びている；

前記焦点から単位距離だけ離れた原点を有する、第 2 の 3 D 直交座標系を定義すること、ただし、前記第 2 の座標系の第 1 軸は、前記撮像装置の視線の方向に沿って伸びており、前記第 2 の座標系の第 2 軸および第 3 軸は、前記第 1 の座標系の第 2 軸および第 3 軸にそれぞれ実質的に平行であり、それによって前記第 2 の座標系の前記第 2 軸および前記第 3 軸は、前記視線に対して直角な実スケール面を規定しており；

前記焦点から焦点距離だけ離れた原点を有する、第 3 の 3 D 直交座標系を定義すること、ただし、前記第 3 の座標系の第 1 軸は、前記撮像装置の視線の方向に沿って伸びており、前記第 3 の座標系の第 2 軸および第 3 軸は、前記第 2 の座標系の前記第 2 軸および前記第 3 軸の方向に対して相対的に第 1 と第 2 の角度だけ傾いており、それによって前記第 3 の座標系の前記第 2 軸および前記第 3 軸は、前記視線に対して相対的に非直角な画像面を規定しており；

前記撮像装置によってキャプチャされた実世界の 3 D オブジェクトの点に関連づけられた 3 D 座標を受け取ること；

前記実スケール面への前記点の投影を計算しそれによって第 1 の平面座標の組を得るとともに、前記画像面への前記点の投影を計算しそれによって第 2 の平面座標の組を得ること；および

前記 3 D オブジェクトの前記点に対応する像点の位置を示す前記第 2 の平面座標の組を出力すること。

【請求項 2】

請求項 1 の方法であって、前記実スケール面が前記撮像装置のレンズシステムへの入射 (entry) を確立 (establish) するように前記第 2 の座標系が規定され、前記実スケール面への前記投影が前記撮像装置の外部モデルの出力を表現し、前記画像面が前記レンズシステムへの出力を確立するように前記第 3 の座標系が規定される、方法。

【請求項 3】

請求項 1 の方法であって、受け取った 3 D 座標の組が $[x \ y \ z \ 1]^T$ であり、前記 3 D オブジェクトの前記点の前記実スケール面への投影が、

【数 1】

$$P_1[x \ y \ z \ 1]^T = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \\ z \end{bmatrix} \approx \begin{bmatrix} x/z \\ y/z \\ 1 \\ 1 \end{bmatrix}$$

のように計算され、ここにおいて

≈

は等価スケール演算子であり、 P_1 は前記第 1 座標系についての前記実スケール面への投影演算子である、方法。

【請求項 4】

請求項 3 の方法であって、前記 3 D オブジェクトの前記点の前記画像面への投影は、

10

20

30

40

【数 2】

$$\begin{aligned}
 P_f R(y, \beta) R(x, \alpha) \begin{bmatrix} x & y & z & 1 \end{bmatrix}^T &= \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1/f & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos \beta & 0 & \sin \beta & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ -\sin \beta & 0 & \cos \beta & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \alpha & -\sin \alpha & 0 \\ 0 & \sin \alpha & \cos \alpha & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \\ 1 \end{bmatrix} \\
 &= \begin{bmatrix} h_{11}x + h_{12}y + h_{13}z \\ h_{22}y + h_{23}z \\ h_{31}x + h_{32}y + h_{33}z \\ 1/f(h_{31}x + h_{32}y + h_{33}z) \end{bmatrix} \\
 &\approx \begin{bmatrix} f(h_{11}x + h_{12}y + h_{13}z)/(h_{31}x + h_{32}y + h_{33}z) \\ f(h_{22}y + h_{23}z)/(h_{31}x + h_{32}y + h_{33}z) \\ f \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f(h_{11}x' + h_{12}y' + h_{13})/(h_{31}x' + h_{32}y' + h_{33}) \\ f(h_{22}y' + h_{23})/(h_{31}x' + h_{32}y' + h_{33}) \\ f \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x'' & y'' & f & 1 \end{bmatrix}^T
 \end{aligned}$$

10

のように計算され、ここにおいて P_f は前記画像面への投影演算を定義しており、 f は焦点距離であり、 α は前記第 1 の角度であり、 β は前記第 2 の角度であり、 $R(x, \alpha)$ は前記画像面の軸 x に関する回転行列であり、前記軸 x は前記回転前における前記第 2 座標系の前記第 2 軸に実質的に平行であるように定義され、 $R(y, \beta)$ は前記画像面の軸 y に関する回転行列であり、前記軸 y は前記回転前における前記第 2 座標系の前記第 3 軸に実質的に平行であるように定義され、前記角度 α だけ回転した前記軸 x に対して相対的に前記回転が実行されるように前記回転が右端で計算され、これらにおいて

$$\begin{aligned}
 h_{11} &= \cos \alpha \cos \beta, \\
 h_{12} &= \sin \alpha \cos \beta, \\
 h_{13} &= \sin \alpha \sin \beta, \\
 h_{22} &= \cos \alpha \sin \beta, \\
 h_{23} &= -\sin \alpha \sin \beta, \\
 h_{31} &= -\sin \alpha \cos \beta, \\
 h_{32} &= \cos \alpha \sin \beta, \text{ および} \\
 h_{33} &= \cos \alpha \cos \beta
 \end{aligned}$$

である、方法。

30

【請求項 5】

請求項 4 の方法であって、前記実スケール面と前記画像面との間のホモグラフィック変換 H を

【数 3】

$$H = \begin{bmatrix} fh_{11} & fh_{12} & fh_{13} \\ 0 & fh_{22} & fh_{23} \\ h_{31} & h_{32} & h_{33} \end{bmatrix}$$

40

のように決定することをさらに備え、ここにおいて h_{31} および h_{32} は前記画像面の x および y スケールに透視補正を適用する非ゼロ要素であり、平面座標の前記第 2 の組 (x'', y'') は前記実スケール面の前記点の画像が歪んだ位置 (x', y') についてのホモグラフィック変換であり、前記ホモグラフィック変換は、

【数 4】

$$\begin{bmatrix} x'' & y'' & 1 \end{bmatrix}^T \approx \begin{bmatrix} u & v & w \end{bmatrix}^T = H \begin{bmatrix} x' & y' & 1 \end{bmatrix}^T$$

のように表現され、ここにおいて

$$u = f(\cos \theta \cos \alpha + \sin \theta \sin \alpha \cos \beta),$$

$$v = f(\cos \theta \sin \alpha - \sin \theta \cos \alpha \cos \beta),$$

$$w = -\sin \theta + \cos \theta \cos \beta,$$

$$x' = u/w + CX, \text{ および}$$

$$y' = v/w + CY$$

であって、(CX, CY) は前記第 3 の座標系での前記原点の位置である、方法。

【請求項 6】

請求項 5 の方法であって、前記ホモグラフィ H は、

【数 5】

$$H = \begin{bmatrix} f \cos \beta & f \sin \beta \sin \alpha & f \sin \beta \cos \alpha \\ 0 & f \cos \alpha & -f \sin \alpha \\ -\sin \beta & \cos \beta \sin \alpha & \cos \beta \cos \alpha \end{bmatrix} \sim \begin{bmatrix} f & f \alpha \beta & f \beta \\ 0 & f & -f \alpha \\ -\beta & \alpha & 1 \end{bmatrix}$$

のように計算され、ここにおいて、微小角 α および β について、

$$\cos \theta \sim 1$$

および

$$\sin \theta \sim \theta$$

の近似が使用されている、方法。

【請求項 7】

請求項 1 の方法であって、

前記実スケール面における前記撮像装置のレンズ収差を補償することをさらに備え、当該補償は、

$$r' = r + k_1 r^3 + k_2 r^5 + \dots,$$

のように定義されたレンズ収差補正モデルを適用することを備え、ここにおいて、平面座標の前記第 1 の組は前記実スケール面上の前記点の画像の歪みがない位置(x, y)を極座標(r, θ)で表現したものを備え、ここにおいて $r^2 = x^2 + y^2$ および $\tan \theta = y/x$ であり (x', y') は前記画像面での前記点の投影前の前記レンズの出力において歪んだ位置(x, y)を表現しており、r' は (x', y') に基づいて計算され歪んだラジアル距離であり、そして k_1 および k_2 は前記レンズの幾何学的収差パラメータである、方法。

【請求項 8】

校正と画像補正との際に撮像装置をモデリングするために使用されるシステムであって、前記システムは、以下のものを備える：

メモリ；

プロセッサ；および

前記メモリに格納され、前記プロセッサによって以下のことを実行可能な少なくともひとつのアプリケーション、

前記撮像装置の焦点に原点を有する第 1 の 3 D 直交座標系を定義すること、ただし、前記第 1 の座標系の第 1 軸は、前記撮像装置の視線の方向に沿って伸びている；

前記焦点から単位距離だけ離れた原点を有する、第 2 の 3 D 直交座標系を定義すること、ただし、前記第 2 の座標系の第 1 軸は、前記撮像装置の視線の方向に沿って伸びており、前記第 2 の座標系の第 2 軸および第 3 軸は、前記第 1 の座標系の第 2 軸および第 3 軸にそれぞれ実質的に平行であり、それによって前記第 2 の座標系の第 2 軸および前記第 3 軸は、前記視線に対して直角な実スケール面を規定しており；

10

20

30

40

50

前記焦点から焦点距離だけ離れた原点を有する、第3の3D直交座標系を定義すること、ただし、前記第3の座標系の第1軸は、前記撮像装置の視線の方向に沿って伸びており、前記第3の座標系の第2軸および第3軸は、前記第2の座標系の前記第2軸および前記第3軸の方向に対して相対的に第1と第2の角度だけ傾いており、それによって前記第3の座標系の前記第2軸および前記第3軸は、前記視線に対して相対的に非直角な画像面を規定しており；

前記撮像装置によってキャプチャされた実世界の3Dオブジェクトの点に関連づけられた3D座標を受け取ること；

前記実スケール面への前記点の投影を計算しそれによって第1の平面座標の組を得るとともに、前記画像面への前記点の投影を計算しそれによって第2の平面座標の組を得ること；および

前記3Dオブジェクトの前記点に対応する像点の位置を示す前記第2の平面座標の組を出力すること。

【請求項9】

請求項8のシステムであって、前記少なくともひとつのアプリケーションが前記プロセッサによって実行されて、前記実スケール面が前記撮像装置のレンズシステムへの入射（entry）を確立（establish）するように前記第2の座標系を規定することと、前記実スケール面への前記投影が前記撮像装置の外部モデルの出力を表現し前記画像面が前記レンズシステムへの出力を確立（establish）するように前記第3の座標系を規定すること、とが可能なシステム。

【請求項10】

請求項8のシステムであって、前記少なくともひとつのアプリケーションが前記プロセッサによって実行されて、

前記3D座標の組 $[x \ y \ z \ 1]^T$ を受け取ることと、前記3Dオブジェクトの前記点の前記実スケール面への投影を、

【数6】

$$P_1[x \ y \ z \ 1]^T = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \\ z \end{bmatrix} \approx \begin{bmatrix} x/z \\ y/z \\ 1 \\ 1 \end{bmatrix}$$

のように計算することとが可能であり、ここにおいて

≈

は等価スケール演算子であり、 P_1 は前記第1座標系についての前記実スケール面への投影演算子である、システム。

【請求項11】

請求項10のシステムであって、前記少なくともひとつのアプリケーションが前記プロセッサによって実行されて、

前記3Dオブジェクトの前記点の前記画像面への投影が、

10

20

30

40

【数 7】

$$\begin{aligned}
 P_f R(y, \beta) R(x, \alpha) \begin{bmatrix} x & y & z & 1 \end{bmatrix}^T &= \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1/f & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos \beta & 0 & \sin \beta & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ -\sin \beta & 0 & \cos \beta & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \alpha & -\sin \alpha & 0 \\ 0 & \sin \alpha & \cos \alpha & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \\ 1 \end{bmatrix} \\
 &= \begin{bmatrix} h_{11}x + h_{12}y + h_{13}z \\ h_{22}y + h_{23}z \\ h_{31}x + h_{32}y + h_{33}z \\ 1/f(h_{31}x + h_{32}y + h_{33}z) \end{bmatrix} \\
 &\approx \begin{bmatrix} f(h_{11}x + h_{12}y + h_{13}z)/(h_{31}x + h_{32}y + h_{33}z) \\ f(h_{22}y + h_{23}z)/(h_{31}x + h_{32}y + h_{33}z) \\ f \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f(h_{11}x' + h_{12}y' + h_{13})/(h_{31}x' + h_{32}y' + h_{33}) \\ f(h_{22}y' + h_{23})/(h_{31}x' + h_{32}y' + h_{33}) \\ f \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x'' & y'' & f & 1 \end{bmatrix}^T
 \end{aligned}$$

10

のように計算され、ここにおいて P_f は前記画像面への投影演算を定義しており、 f は焦点距離であり、 α は前記第 1 の角度であり、 β は前記第 2 の角度であり、 $R(x, \alpha)$ は前記画像面の軸 x に関する回転行列であり、前記軸 x は前記回転前における前記第 2 座標系の前記第 2 軸に実質的に平行であるように定義され、 $R(y, \beta)$ は前記画像面の軸 y に関する回転行列であり、前記軸 y は前記回転前における前記第 2 座標系の前記第 3 軸に実質的に平行であるように定義され、前記角度 α だけ回転した前記軸 x に対して相対的に前記回転が実行されるように前記回転が右端で計算され、これらにおいて

$$\begin{aligned}
 h_{11} &= \cos \alpha, \\
 h_{12} &= \sin \alpha \sin \beta, \\
 h_{13} &= \sin \alpha \cos \beta, \\
 h_{22} &= \cos \beta, \\
 h_{23} &= -\sin \beta, \\
 h_{31} &= -\sin \alpha, \\
 h_{32} &= \cos \alpha \sin \beta, \text{ および} \\
 h_{33} &= \cos \alpha \cos \beta
 \end{aligned}$$

である、システム。

30

【請求項 12】

請求項 11 のシステムであって、前記少なくともひとつのアプリケーションが前記プロセッサによって実行されて、

前記実スケール面と前記画像面との間のホモグラフィック変換 H を、

【数 8】

$$H = \begin{bmatrix} fh_{11} & fh_{12} & fh_{13} \\ 0 & fh_{22} & fh_{23} \\ h_{31} & h_{32} & h_{33} \end{bmatrix}$$

40

のように決定することが可能であり、ここにおいて h_{31} および h_{32} は前記画像面の x および y スケールに透視補正を適用する非ゼロ要素であり、平面座標の前記第 2 の組 (x'', y'') は前記実スケール面の前記点の画像の歪んだ位置 (x', y') についてのホモグラフィック変換であり、前記ホモグラフィック変換は、

【数 9】

$$\begin{bmatrix} x'' & y'' & 1 \end{bmatrix}^T \approx \begin{bmatrix} u & v & w \end{bmatrix}^T = H \begin{bmatrix} x' & y' & 1 \end{bmatrix}^T$$

のように表現され、ここにおいて

$$u = f(\cos \alpha \cos \beta \sin \alpha' + \sin \alpha \sin \beta \sin \alpha' + \sin \alpha \cos \beta \cos \alpha'),$$

$$v = f(\cos \alpha \cos \beta \sin \alpha' - \sin \alpha \sin \beta \sin \alpha'),$$

$$w = -\sin \alpha \cos \beta \sin \alpha' + \cos \alpha \sin \beta \sin \alpha' + \cos \alpha \cos \beta \cos \alpha',$$

$$x'' = u/w + CX, \text{ および}$$

$$y'' = v/w + CY$$

10

であって、(CX, CY) は前記第 3 の座標系での前記原点の位置である、システム。

【請求項 13】

請求項 12 のシステムであって、前記少なくともひとつのアプリケーションが前記プロセッサによって実行されて、

前記ホモグラフィ H を、

【数 10】

$$H = \begin{bmatrix} f \cos \beta & f \sin \beta \sin \alpha & f \sin \beta \cos \alpha \\ 0 & f \cos \alpha & -f \sin \alpha \\ -\sin \beta & \cos \beta \sin \alpha & \cos \beta \cos \alpha \end{bmatrix} \sim \begin{bmatrix} f & f \alpha \beta & f \beta \\ 0 & f & -f \alpha \\ -\beta & \alpha & 1 \end{bmatrix}$$

20

のように計算することが可能であり、ここにおいて、微小角 α および β について、

$$\cos \theta \sim 1$$

および

$$\sin \theta \sim \theta$$

の近似が使用されている、システム。

【請求項 14】

請求項 1 のシステムであって、前記少なくともひとつのアプリケーションが前記プロセッサによって実行されて、

30

前記実スケール面における前記撮像装置のレンズの収差を補償することが可能であり、当該補償は、

$$r' = r + k_1 r^3 + k_2 r^5 + \dots,$$

のように定義されたレンズ収差補正モデルを適用することを備え、ここにおいて、平面座標の前記第 1 の組は前記実スケール面上の前記点の画像の歪みがない位置(x, y)を極座標(r, θ)で表現したものを備え、ここにおいて $r^2 = x^2 + y^2$ および $\tan \theta = y/x$ であり (x', y') は前記画像面での前記点の投影前の前記レンズの出力において歪んだ位置(x, y)を表現しており、r' は (x', y') に基づいて計算され歪んだラジアル距離であり、そして k_1 および k_2 は前記レンズの幾何学的収差パラメータである、システム。

【請求項 15】

40

請求項 10 のシステムであって、前記撮像装置が、ズームレンズカメラ、近赤外撮像装置、短波長赤外撮像装置、長波長赤外撮像装置、レーダ装置、光検出測距装置、パラボラミラー望遠イメージャ、外科的内視鏡カメラ、コンピュータ断層撮影走査装置、サテライト撮像装置、ソナー装置、およびマルチスペクトルセンサフュージョンシステムうちのひとつを備える、システム。

【請求項 16】

プロセッサによって実行されることによって、校正と画像補正との際に撮像装置をモデリングすることを可能なプログラムコードが格納されたコンピュータ読み取り可能な媒体であって、前記プログラムコードは、以下のことを可能とする：

前記撮像装置の焦点に原点を有する第 1 の 3D 直交座標系を定義すること、ただし、前

50

記第 1 の座標系の第 1 軸は、前記撮像装置の視線の方向に沿って伸びている；

前記焦点から単位距離だけ離れた原点を有する、第 2 の 3 D 直交座標系を定義すること、ただし、前記第 2 の座標系の第 1 軸は、前記撮像装置の視線の方向に沿って伸びており、前記第 2 の座標系の第 2 軸および第 3 軸は、前記第 1 の座標系の第 2 軸および第 3 軸にそれぞれ実質的に平行であり、それによって前記第 2 の座標系の前記第 2 軸および前記第 3 軸は、前記視線に対して直角な実スケール面を規定しており；

前記焦点から焦点距離だけ離れた原点を有する、第 3 の 3 D 直交座標系を定義すること、ただし、前記第 3 の座標系の第 1 軸は、前記撮像装置の視線の方向に沿って伸びており、前記第 3 の座標系の第 2 軸および第 3 軸は、前記第 2 の座標系の前記第 2 軸および前記第 3 軸の方向に対して相対的に第 1 と第 2 の角度だけ傾いており、それによって前記第 3 の座標系の前記第 2 軸および前記第 3 軸は、前記視線に対して相対的に非直角な画像面を規定しており；

前記撮像装置によってキャプチャされた実世界の 3 D オブジェクトの点に関連づけられた 3 D 座標を受け取ること；

前記実スケール面への前記点の投影を計算しそれによって第 1 の平面座標の組を得るとともに、前記画像面への前記点の投影を計算しそれによって第 2 の平面座標の組を得ること；および

前記 3 D オブジェクトの前記点に対応する像点の位置を示す前記第 2 の平面座標の組を出力すること。

【発明の詳細な説明】

【技術分野】

【0001】

本発明は、撮像装置のモデリングおよび撮像装置の画像面に対する視軸線の直角度における欠陥を補償する校正を行うシステムおよび方法に関する。

【背景技術】

【0002】

デジタルカメラおよび他の撮像装置の校正は、像が、レンズを通して撮像素子の表面にどのように表示されるのかを示す数学的モデルを構築しようとする。その手順は、最初に、誤差が正確に分かっている校正ターゲットの画像を用いて、当該画像から各ターゲット要素を抽出する。最終的に、ある数学的モデルが当該画像情報をターゲットの真の三次元 (3D) 情報に関連づける。一旦、校正されれば、その撮像装置は、スケールファクタ、すなわち焦点距離 f を用いて実世界オブジェクトの測量に用いることができる。市販のカメラとレンズを用いる場合にはレンズ焦点距離の誤差を補償するためにカメラを校正する必要があり、その誤差は、10%にもなり得る。

【0003】

さらに、一旦、モデルが正確に分かった場合には、殆ど全てのハイエンド自動撮像システムに必要な、ピンホールとも称される完全なカメラ画像を再構築するために当該モデルを用いることができる。ソフトウェアによる画像の修正によって、レンズの不完全な性質により生ずる画像の誤差、すなわち、幾何学的収差と言われる魚眼像状の変形と、色収差と言われるレンズ光学系における虹色状の光の分離を補償することができる。幾つかの撮像装置は、画像面に対して、直角度の無い視線のバイアスを示す。画像の歪みを正確に測定するためには、レンズの視線に対する画像面の直角度の無さが、補償される必要が有る。既知の校正技術は、当該目的のために、傾き軸推定を用いる。しかしながら、この推定は、モデルの全てのカメラパラメータを偏らせることが判っており、系統的な測定誤差を生ずる。その結果、スケールサイズ歪み (a scale-size-distortion) のバイアスが画像に生じ、他の全てのカメラパラメータが当該バイアスを補償しようとして、これらのカメラパラメータも同様に偏る。これは、三次元スキャン若しくは遠隔測定法において、カメラで同時に測定された一対の画像から三次元対象物を再構成するときに、三次元対象物の形状および位置のバイアスに変換される。

【0004】

10

20

30

40

50

従って、撮像装置の既存の校正技術およびモデリング技術を改良する必要がある。

【先行技術文献】

【非特許文献】

【0005】

【非特許文献1】Frederic Devernay. A Non-Maxima Suppression Method for Edge Detection with Sub-Pixel Accuracy. INRIA: INSTITUT NATIONAL DE RECHERCHE EN INFORMATIQUE ET EN AUTOMATIQUE. Report N° 2724, November 1995, 20 pages.

【非特許文献2】Y. M. Harry Ng, C. P. Kwong. Correcting the Chromatic Aberration in Barrel Distortion of Endoscopic Images. Department of Automation and Computer Aided Engineering, Chinese University of Hong Kong. 6 pages

【非特許文献3】Shawn Becker. Semiautomatic Camera Lens Calibration from Partially Known Structure. MIT: Massachusetts Institute of Technology. <http://alumni.media.mit.edu/~sbeck/results/Distortion/distortion.html> (c)1994, 1995

【非特許文献4】Konstantinos G. Derpanis. The Harris Corner Detector. October 2004, 2 pages.

【非特許文献5】L.H. Hartley, P. Sturm. Triangulation. Proc. of the ARPA Image Understanding Workshop 1994, Monterey, CA 1994, pp. 957-966.

【発明の概要】

【発明が解決しようとする課題】

【0006】

提案される校正およびモデリング技術は、結像面に対するレンズ軸の非直角性を生じさせるような、撮像装置またはカメラ/レンズ系の組み立てにおける公差を考慮した透視の正確な補正を導入する。

【0007】

カメラ平面とレンズ組み立て部品の正確な知見は、デジタルカメラまたはステレオカメラを用いる3Dスキャンおよび遠隔測定システムにおいて、系統的なバイアスを取り除き、正確な焦点距離(画像スケール)を生じさせ、真の像の中心をカメラ平面上に定め、像の湾曲(幾何学的収差)およびレンズ光学系における虹状の光の分離(色収差)により生ずる歪みの測定精度を増加させる。

【0008】

カメラ平面とレンズ組み立て部品の正確な知見は、コンピュータ計算の効率性と、幾何学的および色的なレンズ収差の除去の正確さとを増大させる。

【0009】

レンズ収差の除去は、いかなる損失も生ずることなく画像圧縮率を増加させる。

【課題を解決するための手段】

【0010】

第1の広汎な局面に従うと、ここで説明されているのは、校正と補正とを行う際に撮像装置をモデリングするために使用される、コンピュータによって実現される方法であって、前記方法は以下のものを備える：前記撮像装置の焦点に原点を有する第1の3D直交座標系(a first 3D orthogonal coordinate system)を定義すること、ただし、前記第1の座標系の第1軸は、前記撮像装置の視線の方向に沿って伸びている；前記焦点から単位距離(a unitary distance)だけ離れた原点を有する、第2の3D直交座標系を定義すること、ただし、前記第2の座標系の第1軸は、前記撮像装置の視線の方向に沿って伸びており、前記第2の座標系の第2軸および第3軸は、前記第1の座標系の第2軸および第3軸にそれぞれ実質的に平行であり、それによって前記第2の座標系の第2軸および前記第3軸は、前記視線に対して直角な実スケール面を規定しており；前記焦点から焦点距離だけ離れた原点を有する、第3の3D直交座標系を定義すること、ただし、前記第3の座標系の第1軸は、前記撮像装置の視線の方向に沿って伸びており、前記第3の座標系の第2軸および第3軸は、前記第1の座標系の第2軸および前記第3軸の方向に対して相対的に第1と第2の角度だけ傾いており、それによって前記第3の座標系の第2軸およ

び前記第 3 軸は、前記視線に対して相対的に非直角な画像面を規定しており；前記撮像装置によってキャプチャされた実世界の 3 D オブジェクトの点に関連づけられた 3 D 座標を受け取ること；前記実スケール面への前記点の投影を計算しそれによって第 1 の平面座標の組(a first set of planar coordinates)を得るとともに、前記画像面への前記点の投影を計算しそれによって第 2 の平面座標の組を得ること；および前記 3 D オブジェクトの前記点に対応する像点の位置を示す前記第 2 の平面座標の組を出力することである。

【 0 0 1 1 】

いくつかの実施例においては、前記実スケール面が前記撮像装置のレンズシステムへの入射を確立するように前記第 2 の座標系が規定され、前記実スケール面への前記投影が前記撮像装置の外部モデルの出力を表現し、前記画像面が前記レンズシステムへの出力を確立するように前記第 3 の座標系が規定される。

10

【 0 0 1 2 】

いくつかの実施例においては、受け取った 3 D 座標の組が $[x \ y \ z \ 1]^T$ であり、前記 3 D オブジェクトの前記点の前記実スケール面への投影が、

【 0 0 1 3 】

【 数 1 】

$$P_1[x \ y \ z \ 1]^T = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \\ z \end{bmatrix} \approx \begin{bmatrix} x/z \\ y/z \\ 1 \\ 1 \end{bmatrix}$$

20

【 0 0 1 4 】

のように計算され、ここにおいて

≈

は等価スケール演算子であり、P1は前記第 1 座標系についての前記実スケール面への投影演算子である。

【 0 0 1 5 】

30

いくつかの実施例においては、前記 3 D オブジェクトの前記点の前記画像面への投影は、

【 0 0 1 6 】

【数 2】

$$\begin{aligned}
 P_f R(y, \beta) R(x, \alpha) \begin{bmatrix} x & y & z & 1 \end{bmatrix}^T &= \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1/f & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos \beta & 0 & \sin \beta & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ -\sin \beta & 0 & \cos \beta & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \alpha & -\sin \alpha & 0 \\ 0 & \sin \alpha & \cos \alpha & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \\ 1 \end{bmatrix} \\
 &= \begin{bmatrix} h_{11}x + h_{12}y + h_{13}z \\ h_{22}y + h_{23}z \\ h_{31}x + h_{32}y + h_{33}z \\ 1/f(h_{31}x + h_{32}y + h_{33}z) \end{bmatrix} \\
 &\approx \begin{bmatrix} f(h_{11}x + h_{12}y + h_{13}z)/(h_{31}x + h_{32}y + h_{33}z) \\ f(h_{22}y + h_{23}z)/(h_{31}x + h_{32}y + h_{33}z) \\ f \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f(h_{11}x' + h_{12}y' + h_{13})/(h_{31}x' + h_{32}y' + h_{33}) \\ f(h_{22}y' + h_{23})/(h_{31}x' + h_{32}y' + h_{33}) \\ f \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x'' & y'' & f & 1 \end{bmatrix}^T
 \end{aligned}$$

10

【0017】

のように計算され、ここにおいて P_f は前記画像面への投影演算を定義しており、 f は焦点距離であり、 α は前記第 1 の角度であり、 β は前記第 2 の角度であり、 $R(x, \alpha)$ は前記画像面の軸 x に関する回転行列であり、前記軸 x は前記回転前における前記第 1 座標系の前記第 2 軸に実質的に平行であるように定義され、 $R(y, \beta)$ は前記画像面の軸 y に関する回転行列であり、前記軸 y は前記回転前における前記第 1 座標系の前記第 3 軸に実質的に平行であるように定義され、前記角度 α だけ回転した前記軸 x に対して相対的に前記回転が実行されるように前記回転が右端で計算され、これらにおいて

20

$$\begin{aligned}
 h_{11} &= \cos \alpha, \\
 h_{12} &= \sin \alpha \sin \beta, \\
 h_{13} &= \sin \alpha \cos \beta, \\
 h_{22} &= \cos \beta, \\
 h_{23} &= -\sin \beta, \\
 h_{31} &= -\sin \alpha, \\
 h_{32} &= \cos \alpha \sin \beta, \text{ および} \\
 h_{33} &= \cos \alpha \cos \beta
 \end{aligned}$$

30

【0018】

いくつかの実施例においては、当該方法が、前記実スケール面と前記画像面との間のホモグラフィック変換 H を、

【0019】

【数 3】

40

$$H = \begin{bmatrix} fh_{11} & fh_{12} & fh_{13} \\ 0 & fh_{22} & fh_{23} \\ h_{31} & h_{32} & h_{33} \end{bmatrix}$$

【0020】

のように決定することをさらに備え、ここにおいて h_{31} および h_{32} は前記画像面の x および y スケールに透視補正を適用する非ゼロ要素であり、平面座標の前記第 2 の組 (x'', y'') は前記実スケール面の前記点の画像が歪んだ位置 (x', y') についてのホモグラフィック変換であり、前記ホモグラフィック変換は、

50

【 0 0 2 1 】

【 数 4 】

$$\begin{bmatrix} x'' & y'' & 1 \end{bmatrix}^T \approx \begin{bmatrix} u & v & w \end{bmatrix}^T = H \begin{bmatrix} x' & y' & 1 \end{bmatrix}^T$$

【 0 0 2 2 】

のように表現され、ここにおいて

$$u = f(\cos \alpha \sin \beta \sin \alpha + \sin \alpha \cos \beta \sin \alpha),$$

$$v = f(\cos \alpha \sin \beta \cos \alpha - \sin \alpha \cos \beta \cos \alpha),$$

$$w = -\sin \alpha \sin \beta \sin \alpha + \cos \alpha \cos \beta \sin \alpha,$$

$$x'' = u/w + CX, \text{ および}$$

$$y'' = v/w + CY$$

であって、(CX, CY) は前記第 3 の座標系での前記原点の位置である。

【 0 0 2 3 】

いくつかの実施例においては、前記ホモグラフィ H は、

【 0 0 2 4 】

【 数 5 】

$$H = \begin{bmatrix} f \cos \beta & f \sin \beta \sin \alpha & f \sin \beta \cos \alpha \\ 0 & f \cos \alpha & -f \sin \alpha \\ -\sin \beta & \cos \beta \sin \alpha & \cos \beta \cos \alpha \end{bmatrix} \approx \begin{bmatrix} f & f \alpha \beta & f \beta \\ 0 & f & -f \alpha \\ -\beta & \alpha & 1 \end{bmatrix}$$

【 0 0 2 5 】

のように計算され、ここにおいて、

$$\approx$$

は等価スケール演算子であり、微小角 α および β について、

$$\cos \theta \sim 1$$

および

$$\sin \theta \sim \theta$$

の近似が使用されている。

【 0 0 2 6 】

いくつかの実施例においては、当該方法が、前記実スケール面における前記撮像装置のレンズ収差を補償することをさらに備え、当該補償は、

$$r' = r + k_1 r^3 + k_2 r^5 + \dots,$$

のように定義されたレンズ収差補正モデルを適用することを備え、ここにおいて、平面座標の前記第 1 の組は前記実スケール面上の前記点の画像の歪みがない位置(x, y)を極座標(r, θ)で表現したものを備え、ここにおいて $r^2 = x^2 + y^2$ および $\tan \theta = y/x$ であり (x', y') は前記画像面での前記点の投影前の前記レンズの出力において歪んだ位置(x, y)を表現しており、r' は (x', y') に基づいて計算され歪んだラジアル距離であり、そして k_1 および k_2 は前記レンズの幾何学的収差パラメータである。

【 0 0 2 7 】

第 2 の広汎な局面に従うと、ここで説明されているのは、校正と画像補正との際に撮像装置をモデリングするために使用されるシステムであって、前記システムは、以下のものを備える：メモリ；プロセッサ；および前記メモリに格納され、前記プロセッサによって以下のことを実行可能な少なくともひとつのアプリケーション、前記撮像装置の焦点に原点を有する第 1 の 3 D 直交座標系を定義すること、ただし、前記第 1 の座標系の第 1 軸は、前記撮像装置の視線の方向に沿って伸びている；前記焦点から単位距離だけ離れた原点を有する、第 2 の 3 D 直交座標系を定義すること、ただし、前記第 2 の座標系の第 1 軸は、前記撮像装置の視線の方向に沿って伸びており、前記第 2 の座標系の第 2 軸および第 3

10

20

30

40

50

軸は、前記第 1 の座標系の第 2 軸および第 3 軸にそれぞれ実質的に平行であり、それによって前記第 2 の座標系の前記第 2 軸および前記第 3 軸は、前記視線に対して直角な実スケール面を規定しており；前記焦点から焦点距離だけ離れた原点を有する、第 3 の 3 D 直交座標系を定義すること、ただし、前記第 3 の座標系の第 1 軸は、前記撮像装置の視線の方向に沿って伸びており、前記第 3 の座標系の第 2 軸および第 3 軸は、前記第 1 の座標系の前記第 2 軸および前記第 3 軸の方向に対して相対的に第 1 と第 2 の角度だけ傾いており、それによって前記第 3 の座標系の前記第 2 軸および前記第 3 軸は、前記視線に対して相対的に非直角な画像面を規定しており；前記撮像装置によってキャプチャされた実世界の 3 D オブジェクトの点に関連づけられた 3 D 座標を受け取ること；前記実スケール面への前記点の投影を計算しそれによって第 1 の平面座標の組を得るとともに、前記画像面への前記点の投影を計算しそれによって第 2 の平面座標の組を得ること；および前記 3 D オブジェクトの前記点に対応する像点の位置を示す前記第 2 の平面座標の組を出力することである。

10

【 0 0 2 8 】

いくつかの実施例においては、前記少なくともひとつのアプリケーションが前記プロセッサによって実行されて、前記実スケール面が前記撮像装置のレンズシステムへの入射を確立するように前記第 2 の座標系を規定することと、前記実スケール面への前記投影が前記撮像装置の外部モデルの出力を表現し前記画像面が前記レンズシステムへの出力を確立するように前記第 3 の座標系を規定すること、とが可能である。

20

【 0 0 2 9 】

いくつかの実施例においては、前記少なくともひとつのアプリケーションが前記プロセッサによって実行されて、前記 3 D 座標の組 $[x \ y \ z \ 1]^T$ を受け取ることと、前記 3 D オブジェクトの前記点の前記実スケール面への投影を、

【 0 0 3 0 】

【 数 6 】

$$P_1[x \ y \ z \ 1]^T = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \\ z \end{bmatrix} \approx \begin{bmatrix} x/z \\ y/z \\ 1 \\ 1 \end{bmatrix}$$

30

【 0 0 3 1 】

のように計算することとが可能であり、ここにおいて

\approx

は等価スケール演算子であり、 P_1 は前記第 1 座標系についての前記実スケール面への投影演算子である。

【 0 0 3 2 】

いくつかの実施例においては、前記少なくともひとつのアプリケーションが前記プロセッサによって実行されて、前記 3 D オブジェクトの前記点の前記画像面への投影が、

【 0 0 3 3 】

40

【数 7】

$$\begin{aligned}
 P_f R(y, \beta) R(x, \alpha) \begin{bmatrix} x & y & z & 1 \end{bmatrix}^T &= \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1/f & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos \beta & 0 & \sin \beta & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ -\sin \beta & 0 & \cos \beta & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \alpha & -\sin \alpha & 0 \\ 0 & \sin \alpha & \cos \alpha & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \\ 1 \end{bmatrix} \\
 &= \begin{bmatrix} h_{11}x + h_{12}y + h_{13}z \\ h_{22}y + h_{23}z \\ h_{31}x + h_{32}y + h_{33}z \\ 1/f(h_{31}x + h_{32}y + h_{33}z) \end{bmatrix} \\
 &\approx \begin{bmatrix} f(h_{11}x + h_{12}y + h_{13}z)/(h_{31}x + h_{32}y + h_{33}z) \\ f(h_{22}y + h_{23}z)/(h_{31}x + h_{32}y + h_{33}z) \\ f \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f(h_{11}x' + h_{12}y' + h_{13})/(h_{31}x' + h_{32}y' + h_{33}) \\ f(h_{22}y' + h_{23})/(h_{31}x' + h_{32}y' + h_{33}) \\ f \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x'' & y'' & f & 1 \end{bmatrix}^T
 \end{aligned}$$

10

【0034】

のように計算され、ここにおいて P_f は前記画像面への投影演算を定義しており、 f は焦点距離であり、 α は前記第 1 の角度であり、 β は前記第 2 の角度であり、 $R(x, \alpha)$ は前記画像面の軸 x に関する回転行列であり、前記軸 x は前記回転前における前記第 1 座標系の前記第 2 軸に実質的に平行であるように定義され、 $R(y, \beta)$ は前記画像面の軸 y に関する回転行列であり、前記軸 y は前記回転前における前記第 1 座標系の前記第 3 軸に実質的に平行であるように定義され、前記角度 α だけ回転した前記軸 x に対して相対的に前記回転が実行されるように前記回転が右端で計算され、これらにおいて

20

$$\begin{aligned}
 h_{11} &= \cos \alpha, \\
 h_{12} &= \sin \alpha \sin \beta, \\
 h_{13} &= \sin \alpha \cos \beta, \\
 h_{22} &= \cos \beta, \\
 h_{23} &= -\sin \beta, \\
 h_{31} &= -\sin \alpha, \\
 h_{32} &= \cos \alpha \sin \beta, \text{ および} \\
 h_{33} &= \cos \alpha \cos \beta
 \end{aligned}$$

30

【0035】

いくつかの実施例においては、前記少なくともひとつのアプリケーションが前記プロセッサによって実行されて、前記実スケール面と前記画像面との間のホモグラフィック変換 H を、

【0036】

【数 8】

$$H = \begin{bmatrix} fh_{11} & fh_{12} & fh_{13} \\ 0 & fh_{22} & fh_{23} \\ h_{31} & h_{32} & h_{33} \end{bmatrix}$$

40

【0037】

のように決定することが可能であり、ここにおいて h_{31} および h_{32} は前記画像面の x および y スケールに透視補正を適用する非ゼロ要素であり、平面座標の前記第 2 の組 (x'', y'') は前記実スケール面の前記点の画像の歪んだ位置 (x', y') についてのホモグラフィック変換であり、前記ホモグラフィック変換は、

【0038】

50

【数 9】

$$\begin{bmatrix} x'' & y'' & 1 \end{bmatrix}^T \approx \begin{bmatrix} u & v & w \end{bmatrix}^T = H \begin{bmatrix} x' & y' & 1 \end{bmatrix}^T$$

【0039】

のように表現され、ここにおいて

$$u = f(\cos \theta \cdot x' + \sin \theta \cdot \sin \alpha \cdot y' + \sin \theta \cdot \cos \alpha),$$

$$v = f(\cos \theta \cdot y' - \sin \theta),$$

$$w = -\sin \theta \cdot x' + \cos \theta \cdot \sin \alpha \cdot y' + \cos \theta \cdot \cos \alpha,$$

$$x' = u/w + CX, \text{ および}$$

$$y' = v/w + CY$$

であって、(CX, CY)は前記第3の座標系での前記原点の位置である。

【0040】

いくつかの実施例においては、前記少なくともひとつのアプリケーションが前記プロセッサによって実行されて、前記ホモグラフィHを、

【0041】

【数10】

$$H = \begin{bmatrix} f \cos \beta & f \sin \beta \sin \alpha & f \sin \beta \cos \alpha \\ 0 & f \cos \alpha & -f \sin \alpha \\ -\sin \beta & \cos \beta \sin \alpha & \cos \beta \cos \alpha \end{bmatrix} \approx \begin{bmatrix} f & f\alpha\beta & f\beta \\ 0 & f & -f\alpha \\ -\beta & \alpha & 1 \end{bmatrix}$$

【0042】

のように計算することが可能であり、ここにおいて、微小角 θ および α について、

$$\cos \theta \sim 1$$

および

$$\sin \theta \sim \theta$$

の近似が使用されている。

【0043】

いくつかの実施例においては、前記少なくともひとつのアプリケーションが前記プロセッサによって実行されて、前記実スケール面における前記撮像装置のレンズの収差を補償することが可能であり、当該補償は、

$$r' = r + k_1 r^3 + k_2 r^5 + \dots,$$

のように定義されたレンズ収差補正モデルを適用することを備え、ここにおいて、平面座標の前記第1の組は前記実スケール面上の前記点の画像の歪みがない位置(x, y)を極座標(r, θ)で表現したものを備え、ここにおいて $r^2 = x^2 + y^2$ および $\tan \theta = y/x$ であり (x', y') は前記画像面での前記点の投影前の前記レンズの出力において歪んだ位置(x, y)を表現しており、r' は (x', y') に基づいて計算され歪んだラジアル距離であり、そして k_1 および k_2 は前記レンズの幾何学的収差パラメータである。

【0044】

いくつかの実施例においては、前記撮像装置が、ズームレンズカメラ、近赤外撮像装置、短波長赤外撮像装置、長波長赤外撮像装置、レーダ装置、光検出測距装置、パラボラミラー望遠イメージャ、外科的内視鏡カメラ、コンピュータ断層撮影走査装置、サテライト撮像装置、ソナー装置、およびマルチスペクトルセンサフュージョンシステムうちのひとつを備える。

【0045】

第3の広汎な局面に従うと、ここで説明されているのは、プロセッサによって実行されることによって、校正と画像補正との際に撮像装置をモデリングすることを可能なプログ

10

20

30

40

50

ラムコードが格納されたコンピュータ読み取り可能な媒体であって、前記プログラムコードは、以下のことを可能とする：前記撮像装置の焦点に原点を有する第1の3D直交座標系を定義すること、ただし、前記第1の座標系の第1軸は、前記撮像装置の視線の方向に沿って伸びている；前記焦点から単位距離だけ離れた原点を有する、第2の3D直交座標系を定義すること、ただし、前記第2の座標系の第1軸は、前記撮像装置の視線の方向に沿って伸びており、前記第2の座標系の第2軸および第3軸は、前記第1の座標系の第2軸および第3軸にそれぞれ実質的に平行であり、それによって前記第2の座標系の前記第2軸および前記第3軸は、前記視線に対して直角な実スケール面を規定しており；前記焦点から焦点距離だけ離れた原点を有する、第3の3D直交座標系を定義すること、ただし、前記第3の座標系の第1軸は、前記撮像装置の視線の方向に沿って伸びており、前記第3の座標系の第2軸および第3軸は、前記第1の座標系の前記第2軸および前記第3軸の方向に対して相対的に第1と第2の角度だけ傾いており、それによって前記第3の座標系の前記第2軸および前記第3軸は、前記視線に対して相対的に非直角な画像面を規定しており；前記撮像装置によってキャプチャされた実世界の3Dオブジェクトの点に関連づけられた3D座標を受け取ること；前記実スケール面への前記点の投影を計算しそれによって第1の平面座標の組を得るとともに、前記画像面への前記点の投影を計算しそれによって第2の平面座標の組を得ること；および前記3Dオブジェクトの前記点に対応する像点の位置を示す前記第2の平面座標の組を出力することである。

10

【図面の簡単な説明】

【0046】

20

【図1】レンズの収差を示す模式図である。

【図2】樽形および糸巻き形のレンズの幾何学的収差を示す模式図である。

【図3】2つの隣接する画素の色が混じるときのエッジのディザリングを示す平面図である。

【図4】視線に対して画像面が直角の理想的なカメラのモデル表現においてカメラとレンズの組合せの挙動を定義するパラメータを示す模式図である。

【図5】図4の理想カメラに傾いた軸の補償が加えられたカメラの内部モデルの傾き軸推定を示す模式図である。

【図6】本発明の例示的な実施形態に沿うカメラの内部モデル用の新しい変数セットを示す模式図である。

30

【図7】本発明の例示的な実施形態に沿う径方向の収差の模式図である。

【図8a】本発明の例示的な実施形態に沿う像点の位置の算出方法を示すフローチャートである。

【図8b】カメラの外部モデルを用いて、 $f = 1$ の平面へ投影する図8aのステップを示すフローチャートである。

【図8c】レンズ収差モデルを適用する図8aのステップを示すフローチャートである。

【図8d】カメラの内部モデルを用いて、傾いた画像面 f 上へ投影する図8aのステップを示すフローチャートである。

【図9a】像点の位置を算出する本発明の例示的な実施形態に沿うシステムを示す模式図である。

40

【図9b】図9aのプロセッサにおいて実行される典型的なアプリケーションを示すブロック図である。

【図10】校正ターゲットの歪みがある写真である。

【図11】回路基板付きのテスト用マイクロレンズカメラの写真である。

【図12】ターゲットの抽出を示す複合図である。

【図13】2つのカメラ画像を同時に用いた対象物の三次元測定用のステレオ写真を示す模式図である。

【図14】テストカメラを用いた幾何学的収差の補正を示す写真である。

【図15】焦点距離4mmのCosmicar（登録商標）のCマウントレンズの色収差を示すグラフである。

50

【図 1 6】像中心（画素）からの距離に対する赤色収差の径方向の補正を示すグラフである。

【図 1 7】像中心（画素）からの距離に対する青色収差の径方向の補正を示すグラフである。

【図 1 8】カラーカメラ用のベイヤー配列のレイアウトを示す模式図である。

【発明を実施するための形態】

【0047】

本願発明のさらなる特徴および利点は、添付された図面と組み合わせられる、以下の詳細な説明から明らかとなる。添付された各図面においては、同様の対象物は、同様の参照符号によって識別されている。

10

【0048】

1.1 レンズ収差

レンズ収差は、デジタルイメージングにおいて見受けられる最大の誤差を招来する。このことは、図 1 および図 2 に描かれている。図 1 に示されるように、魚眼効果は、幾何学的収差と称され、直線を湾曲させる。画像の縁における色つきの濃淡（図 1 おいて「青色エッジ」および「赤色エッジ」と参照される）は、色収差と称され、撮像装置（不図示）のレンズにおける光の分離によって引き起こされる。ピンホールの挙動に対するこれらの偏差は、レンズ角度に関して増加する。サブピクセルの精度を達成するためには、双方の収差は、モデル化されて、補償されねばならず、ソフトウェアを介してのみハードウェア性能を上回る補償が可能となる。図 2 に示されるように、幾何学的収差が画像を圧縮するときには、当該収差は樽形収差（図 2 (a) 参照）と称され、画像が拡張するときには糸巻き形収差（図 2 (b) 参照）と称される。

20

【0049】

1.2 ディザリング

図 3 において、ディザリングは、ある画素をエッジが通り、隣り合う双方の色が混じるときに生ずる中間の画素色である。画素内の各色の各面について、画素の色は、エッジの両側において隣の色値の重み付き平均である。

【0050】

低画質画像において、エッジのディザリング（対象物のエッジにおける濃淡）は、レンズの幾何学的収差および色収差に干渉する。白黒のターゲットについて、ディザリングは、幾何学的収差が生ずるにつれて灰色の影として現れる。それゆえ、エッジの色を用いてエッジのディザリング若しくは幾何学的収差からレンズの色収差を分離することが望ましい。

30

【0051】

1.3 カメラモデル

カメラ若しくは他の撮像装置のモデリングは、カメラとレンズの特有の組合せの挙動を定義するパラメータを測定するために、数学モデルと校正手順を要する。

【0052】

ここでは、カメラが参照されているが、提案するシステムおよび方法は、他の撮像装置へも適用されることが理解されるべきである。特に、ズームレンズカメラと、近赤外線（NIR）、短波長赤外線（SWIR）、および長波長赤外線（LWIR）の赤外線撮像装置と、レーザー並びに光検出及び測距（LIDAR）装置と、放物面鏡望遠撮像装置と、外科用内視鏡カメラと、コンピュータトモグラフィ（CT）スキャン装置と、衛星の撮像装置と、ソナー装置と、マルチスペクトルセンサ融合システムを含み、これらに限定されない各装置に適用される。

40

【0053】

当該主題の公表文献によれば、理想カメラモデルは、図 4 に示されるように、3つの要素を有している、すなわち；

1 - 外部モデル：焦点 O （全ての光が一点に集中する空間中の点）におけるカメラ座標と、ワールド座標系 (X_w, Y_w, Z_w) におけるワールド座標との関係；

50

2 - 内部モデル： Z_C がレンズ軸（すなわち、レンズの視線）であるカメラ平面座標系（ X_C Y_C Z_C ）；および

3 - レンズモデル：レンズの幾何学的収差の式および色収差の式。

【0054】

焦点Oは、全ての像が一点に集中する空間中の場所であり、焦点Oの前にはカメラの画像面(the camera image plane)（不図示）がある。レンズ軸 Z_C は画像面を2つの直角をなして横切る（すなわち、像面と直交する）とともに、像中心位置（ C_X , C_Y ）を定義する。

【0055】

1.3.1 カメラの外部モデル

カメラの外部モデルは、当該文献によって正確に分かり、2つの座標セットを定義する

10

1 - 原点が（0, 0, 0）に設定されたワールド座標（ X_W Y_W Z_W ）；と

2 - 焦点Oにおけるカメラ座標（ X_C Y_C Z_C ）。

【0056】

理想カメラモデルを示す図4から判るように、カメラ座標セット（ X_C Y_C Z_C ）は、レンズ軸 Z_C に端を発して焦点Oを原点とし、 X_C は、水平軸（不図示）と並ぶように選択されている。幾何学的に、垂直軸 Y_C は、右手系規則に則ってカメラ座標セットを完成させる。当該外部モデルは、行列 $[R_{3 \times 3} \quad T_{3 \times 1}]$ （以下にさらに述べる）として記載され、原点を（0, 0, 0）とするワールド座標セット（ X_W Y_W Z_W ）を表現する。

【0057】

20

カメラの外部モデルは、ワールド座標セット（ X_W Y_W Z_W ）に対してカメラ座標セット（ X_C Y_C Z_C ）を配置するために必要な回転（ ）と平行移動（ T_X T_Y T_Z ）とを表現し、ワールド原点（0, 0, 0）に焦点Oを配置する。カメラの外部モデルは、従って、6自由度、すなわち、（ ）回転角度と、平行移動（ T_X T_Y T_Z ）とを有する。

【0058】

1.3.2 カメラの内部モデル

図4に加えて図5を参照しつつ、非直角度(off squareness)の補償を行う先行技術のカメラの内部モデルについて以下に述べる。仮に、画像面がレンズ軸 Z_C と完全に直交する場合には、ワールド測定値 X_W 、 Y_W と、カメラ測定値 X_C 、 Y_C とのスケールファクタは、 x と y の双方向において f となる。製造誤差に起因するレンズ軸 Z_C と画像面との直交度の欠落を考慮するために、研究コミュニティは、図5に示される傾き軸推定(the tilted axis assumption)を紹介している。当該傾き軸推定においては、画像面がレンズ軸と垂直であるとみなされ得るように、画像面の軸の傾きが仮定される。

30

【0059】

本質的に、種々の定式化が存在する：

パラメータ a は、カメラの画素格子配列の水平軸と完全に一直線に並ぶ、水平方向の画像スケールである；

a とは異なる垂直方向のスケールは、 b として設定されている；

画像面の垂直軸のスケールと向きは、傾斜パラメータ s によって、軸 Y_C に対して傾けられており、 s は、画像スケールに対する傾斜のスケールメジャー（a scale measure）である。

40

【0060】

傾き軸推定を用いる公開済みの研究によれば、レンズ軸 Z_C が画像面と交差する点である像中心（ C_X , C_Y ）と共に、 a 、 b 、および s は、カメラの5つの内部パラメータである。従って、カメラの内部モデルは、5自由度を有する。

【0061】

画像面の画素格子配列の製造工程は、非常に正確であり、校正は水平方向の画像スケールを垂直方向の画像スケールに等しくする、すなわち、 $a = b = f$ であり、垂直軸の傾斜はなく、すなわち $s = 0$ となる。広く知られている傾き軸推定は、しかしながら、透視バイアスを導入し、全てのカメラパラメータをシフトする、そして、カメラの画像面の形状

50

を維持する画像面の完全な三次元透視モデルに置き換えられるべきである。従って、カメラ座標（焦点Oを起点とする）内にモデルが表現されている図6に示されるように、カメラの内部モデルに新しい変数セットの導入が提案されている。

【0062】

提案されるモデルでは、像中心 (C_x, C_y) は、レンズ軸 Z_c とカメラ平面（すなわち、結像）平面との交点であり続ける。外部の三次元のワールド対象物（当該対象物の点Pは、各軸 (X_c, Y_c, Z_c) に対して、当該ワールドにおいて何処かの座標に配置される）を対象とする、スケールの影響を受けない2つの同時透視(simultaneous perspectives)が考慮される。

【0063】

実例として、レンズ系の入射口(entry)は、視線軸 Z_c に沿って、 $f = 1$ に位置する理論上の平面として定義され、当該理論上の平面は、図6において2つの軸により示され、 $f = 1$ の単位焦点距離(unit focal distance)を伴い、レンズ軸 Z_c と完全に垂直である。この第1平面は、 x と y において無限次元を有する平面への三次元対象物の完全な1対1の実スケール投影を表わす。

【0064】

$f = 1$ への投影は、従って、行列変換 $[R_{3 \times 3} \ T_{3 \times 1}]$ により表現される：

【0065】

【数11】

$$[R_{3 \times 3} T_{3 \times 1}] = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} & T_x \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} & T_y \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} & T_z \end{bmatrix} \quad (1)$$

【0066】

同次座標を用いて、三次元ワールド座標 (X, Y, Z) は、ワールド座標系 (X_w, Y_w, Z_w) に対して与えられ、 X', Y', Z' はカメラ座標系 (X_c, Y_c, Z_c) に対して与えられる）における点 $P = [X \ Y \ Z \ 1]^T$ は、次のように投影される：

【0067】

【数12】

$$[R_{3 \times 3} T_{3 \times 1}] [X \ Y \ Z \ 1]^T = [X' \ Y' \ Z']^T \approx [X'/Z' \ Y'/Z' \ 1]^T \quad (2)$$

【0068】

ここで、生成される三成分ベクトルの第3成分 Z' は、 $[X' \ Y' \ Z']^T$ が $[X'/Z' \ Y'/Z' \ 1]^T$ に対して等価スケール(scale equivalent)となるように1に再変倍(rescale)される。三次元の点 $P = (X, Y, Z)$ は、 $(X'/Z', Y'/Z')$ として2次元に投影される。方程式(2)における記号

\approx

は、同次座標における等価スケール演算子を表わす。

【0069】

方程式(1)中の要素 r_{ij} 、 $i, j=1, 2, 3$ は、モデルパラメータの関数、すなわち、上述の3つの回転角度（ ）であり、 $(T_x \ T_y \ T_z)$ は、焦点Oに対するワールド原点の位置である。

【0070】

外部の三次元のワールド対象物の実スケール透視に加えて、第2透視は、当該画像面自体、すなわちレンズ系の出力である。図6において、画像面は、 (C_x, C_y) で交差する2つの軸によって表現されている。焦点距離 f の位置にある当該画像面は、レンズ軸 Z_c に対して垂直ではないので、5個のパラメータが必要となる。焦点Oの座標セット(すなわち、

10

20

30

40

50

座標セット(X_C, Y_C, Z_C))において定義されるものと同じ、水平軸と垂直軸の各向きを、 f における画像面上で用いて、 x 軸および y 軸に対する2つの回転角度 θ_x と θ_y が、カメラ平面の傾きを考慮するために使用される。特に、図6に示されるように、画像面の x 軸は、角度 θ_x 回転され、画像面の y 軸は、角度 θ_y 回転されており、その結果、画像面は、 x 軸、 y 軸に対して角度 θ_x 、 θ_y 傾いている、なお、画像面の x 、 y 軸は、当初、すなわち回転前には、原点 O における X_C 、 Y_C 軸に平行である。換言すれば、 x 、 y 軸は、例示的には、画像面を傾ける回転が適用される前に、原点 O における X_C 、 Y_C 軸に平行であり、画像面上に複製されている。その結果、画像面の傾きは空間における2つの三次元回転、すなわち、 Y_C 軸に関する角度 θ_y の回転と、 X_C 軸に関する角度 θ_x の回転によって表現される。画像面の x 軸は、カメラ平面の水平方向と一直線に並ぶように任意に設定されており、従って、 z 軸の回転角度は不要である。幾つかの実施例、例えば、同じ視線を共有する2つの撮像装置がワールド対象物の像を撮影(capture)するために同時に使用されている実施例、若しくは、3-CCDカメラ(3つの電荷結合素子(CCD)を備える)が使用される実施例においては、 z 軸の回転角度が望ましいことを理解すべきである。回転角度 θ_x 、 θ_y に加えて、カメラの内部モデルの残りの3つの自由度は、焦点距離 f (若しくは、カメラの画像スケール)と像中心(C_x, C_y)の座標である。

10

【0071】

図5の一般的な傾き軸推定に対応する内部 K 行列は下記の方程式(3)によって与えられる。

【0072】

20

【数13】

$$K = \left[\begin{array}{cc|c} a & s & C_x \\ 0 & b & C_y \\ \hline 0 & 0 & 1 \end{array} \right] \quad (3)$$

【0073】

方程式(3)における左上の 2×2 行列の区画は、傾斜パラメータ s 、水平方向のスケール a 、および垂直方向のスケール b を伴う、画像面の x 、 y 軸を表す。画像面の x 軸は、各列ベクトルとして与えられ、画像面の x 軸は、 K 行列の2行1列の値0を考慮すると、カメラ平面の画素配列格子(不図示)の水平方向と一列に並ぶ。画像面の y 軸は、図5に示されるように、 x 方向に s 傾いている。最後の列は、像中心位置(C_x, C_y)を表している。

30

【0074】

図5の傾き軸推定の誤りは、左下の 1×2 行列の区画に見受けられる。レンズ軸がカメラ平面に対して垂直でないときには、当該左下の 1×2 区画の2つの項は、0であるべきではない。それらが0でないときには、これらの項は、画像面における x 、 y スケールに対して像中心から離れるように、透視補正を適用する。

【0075】

投影された x 、 y 軸を、それらが透視を表しているように、計算する場合には、従って、レンズ Z_C と完全に垂直なカメラの画像面から開始することが提案される。次に、投影されたカメラの x 、 y 軸が、それぞれ角度 θ_x 、 θ_y 傾くように計算され、これにより、上述のように、レンズ軸と垂直でない画像面が取得される。提案する方法では、カメラの内部モデルは、1対1の実スケールのカメラの外部モデル投影を共通の視線 Z_C 上の焦点距離 f における画像面投影に関連づける、5自由度の透視変換として定義される、そして、原点 O における X_C 、 Y_C と平行な、回転の前の画像面の x 、 y 軸に対して画像面が角度 θ_x 、 θ_y 傾けられる。図6は、視線 Z_C における(C_x, C_y)を示す。図6において、視線と交差する全ての平面の原点が Z_C に設定される。当初は、(C_x, C_y)は、(0,0)に設定され、投影後は、原点がシフトされて、画像面の中心が(0,0)から(C_x, C_y)にずれる。

40

【0076】

50

同次座標においては、次のように、 $[x \ y \ z \ 1]^T$ 空間におけるどのような三次元点も1対1、 $f=1$ の実スケールの平面上に投影される：

【0077】

【数14】

$$P_1[x \ y \ z \ 1]^T = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \\ z \end{bmatrix} \approx \begin{bmatrix} x/z \\ y/z \\ 1 \\ 1 \end{bmatrix} \quad (4)$$

10

【0078】

方程式(4)における最後の演算は、第4座標を1にする再変倍である。第3座標は、点 $(x/z, y/z)$ が、 $Z=1$ の平面上にあることを示す。

【0079】

x, y に対してそれぞれ、傾いた焦点距離が f の画像面について、同一点が当該傾いた画像面に次のように投影される。

【0080】

【数15】

$$P_f R(y, \beta) R(x, \alpha) [x \ y \ z \ 1]^T = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1/f & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos \beta & 0 & \sin \beta & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ -\sin \beta & 0 & \cos \beta & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \alpha & -\sin \alpha & 0 \\ 0 & \sin \alpha & \cos \alpha & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \\ 1 \end{bmatrix} \quad (5)$$

20

【0081】

ここで、 P_f は、4行3列目の要素が $1/f$ である投影演算子であり、 f は、焦点距離、 $R(y, \beta)$ は、 y 軸に対する回転行列、そして、 $R(x, \alpha)$ は、 x 軸に対する回転行列である。

30

【0082】

方程式(5)における回転は、最も右端で計算される、それ故、回転は、 y 軸が角度 β 回転した画像面に対して相対的に実行される。回転は、方程式(5)において最も右端で扱われ得ることを理解すべきである、これは、回転が x 軸の回転に対して相対的に行われることを意味する。右から左に読まれ、かけ算の順序を反転させる同次方程式は、異なる数学的な式を生ずる。幾つかのモデルが可能である。

【0083】

方程式(5)の行列同士を掛け合わせると次式が得られる：

【0084】

【数16】

$$P_f R(y, \beta) R(x, \alpha) [x \ y \ z \ 1]^T = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1/f & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos \beta & \sin \beta \sin \alpha & \sin \beta \cos \alpha & 0 \\ 0 & \cos \alpha & -\sin \alpha & 0 \\ -\sin \beta & \cos \beta \sin \alpha & \cos \beta \cos \alpha & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \\ 1 \end{bmatrix} \quad (6)$$

40

【0085】

【数 1 7】

$$P_f R(y, \beta) R(x, \alpha) \begin{bmatrix} x & y & z & 1 \end{bmatrix}^T = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1/f & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} h_{11} & h_{12} & h_{13} & 0 \\ 0 & h_{22} & h_{23} & 0 \\ h_{31} & h_{32} & h_{33} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \\ 1 \end{bmatrix} \quad (7)$$

【0 0 8 6】

10

【数 1 8】

$$P_f R(y, \beta) R(x, \alpha) \begin{bmatrix} x & y & z & 1 \end{bmatrix}^T = \begin{bmatrix} h_{11}x + h_{12}y + h_{13}z \\ h_{22}y + h_{23}z \\ h_{31}x + h_{32}y + h_{33}z \\ 1/f(h_{31}x + h_{32}y + h_{33}z) \end{bmatrix} \approx \begin{bmatrix} f(h_{11}x + h_{12}y + h_{13}z)/(h_{31}x + h_{32}y + h_{33}z) \\ f(h_{22}y + h_{23}z)/(h_{31}x + h_{32}y + h_{33}z) \\ f \\ 1 \end{bmatrix} \quad (8)$$

【0 0 8 7】

20

最後の演算子（方程式（8））は、再び、第4座標の1 (unity) への再変倍である。

【0 0 8 8】

$P_1 \begin{bmatrix} x & y & z & 1 \end{bmatrix}^T$ と $P_f R(y, \beta) R(x, \alpha) \begin{bmatrix} x & y & z & 1 \end{bmatrix}^T$ とは、同一の三次元点 $\begin{bmatrix} x & y & z & 1 \end{bmatrix}^T$ の2つの投影であり、簡単なホモグラフィック変換 (homographic transformation) によって関連づけられている。 $x' = x/z$ および $y' = y/z$ を代入し、 (x', y') が投影 $P_1 \begin{bmatrix} x & y & z & 1 \end{bmatrix}^T$ であることに留意し、ここで z 成分（1, $z = 1$ に位置する平面）と単位スケールファクタ (unit scale factor) とを切り捨てて、 $P_f R(y, \beta) R(x, \alpha) \begin{bmatrix} x & y & z & 1 \end{bmatrix}^T$ は次のように書ける。

【0 0 8 9】

【数 1 9】

30

$$P_f R(y, \beta) R(x, \alpha) \begin{bmatrix} x & y & z & 1 \end{bmatrix}^T = \begin{bmatrix} f(h_{11}x' + h_{12}y' + h_{13})/(h_{31}x' + h_{32}y' + h_{33}) \\ f(h_{22}y' + h_{23})/(h_{31}x' + h_{32}y' + h_{33}) \\ f \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x'' & y'' & f & 1 \end{bmatrix}^T \quad (9)$$

【0 0 9 0】

ここで

$$\begin{aligned} h_{11} &= \cos \\ h_{12} &= \sin \quad \sin \\ h_{13} &= \sin \quad \cos \\ h_{22} &= \cos \\ h_{23} &= -\sin \\ h_{31} &= -\sin \\ h_{32} &= \cos \quad \sin \\ h_{33} &= \cos \quad \cos \end{aligned}$$

40

$f=1$ と $f=f$ の両平面間のホモグラフィー (homography) H を次のように定義する：

【0 0 9 1】

【数 2 0】

$$H = \begin{bmatrix} fh_{11} & fh_{12} & fh_{13} \\ 0 & fh_{22} & fh_{23} \\ h_{31} & h_{32} & h_{33} \end{bmatrix} \quad (10)$$

【0092】

傾いた画像面の座標 (x'', y'') は、 (x', y') の1対1の実スケール平面投影の一次変換であり、二次元同次座標で表現されている。

【0093】

10

【数 2 1】

$$\begin{bmatrix} x'' & y'' & 1 \end{bmatrix}^T \approx \begin{bmatrix} u & v & w \end{bmatrix}^T = H \begin{bmatrix} x' & y' & 1 \end{bmatrix}^T \quad (11)$$

【0094】

ここで、 $x'' = u/w$ 、 $y'' = v/w$

ここで、記号

\approx

は、同次座標における等価スケールの演算子を表わす。予想されるように、 H (方程式 (10)) の $(2, 1)$ 要素は0であり、 x 軸がカメラ平面の水平格子と平行であることを意味している。第3行(方程式(10)参照)における透視要素 h_{31} と h_{32} は、像中心から遠ざかる平面透視のスケール変化(scale change)を生成する。これらの要素は、カメラ平面がレンズ軸と垂直、すなわち $h_{31} = h_{32} = 0$ であるときに、0になる。

20

【0095】

0でない (C_x, C_y) について、カメラの内部モデルは、同次座標において扱われなければならないので、像中心 (C_x, C_y) を加える前に、透視の再変倍が必要となる。1対1の実スケールの外部モデルの点 (x', y') と、画像面の座標 (x'', y'') との間の、レンズ収差を仮定しない、二段階プロセスにおいて、以下が得られる：

ステップ1： $\begin{bmatrix} u & v & w \end{bmatrix}^T = H \begin{bmatrix} x' & y' & 1 \end{bmatrix}^T$

$$u = f(\cos \theta_x x' + \sin \theta_x \sin \theta_y y' + \sin \theta_x \cos \theta_y)$$

$$v = f(\cos \theta_y y' - \sin \theta_y) \quad (12)$$

$$w = -\sin \theta_x x' + \cos \theta_x \sin \theta_y y' + \cos \theta_x \cos \theta_y$$

30

ステップ2：単位の $w=1$ への再変倍と、像点 (x'', y'') を与える (C_x, C_y) の平行移動

$$x'' = (u/w + C_x)$$

$$y'' = (v/w + C_y) \quad (13)$$

レンズ収差が無い場合、校正は、従って、2つの射影間の最良の一致を探索する。空間のあらゆる点は、2つの独立した投影面、すなわち実スケール面(true scale plane)と、傾いた画像面に写る。上述のように、 $f = 1$ (すなわち、実スケール)の平面は、例示的に、レンズ軸と完全に垂直であり、6自由度： (C_x, C_y, C_z) と (T_x, T_y, T_z) を有し、提案する外部モデル(すなわち、カメラ座標とワールド座標との関係)を与える。 f において、カメラ(すなわち、結像)平面は、実スケール平面に対してスケールが変化しない： f における画像は、 $f=1$ の実スケール画像の単なる変倍したものではない。 f において、画像面は5自由度：面の傾き角度 θ_x, θ_y と、像中心 (C_x, C_y) と、焦点距離 f 、を有し、内部モデルを与える。

40

【0096】

$f=1$ の実サイズ平面上の1点は、当該傾斜した画像面上の1点に対応し、 $f = 1$ と $f = f$ との間での全ての対応点ペアは、(レンズ収差が無い状況では)焦点 O に集まる各線を定義する。しかし、当該2面間でレンズ収差が発生し、当該収差は、モデルにおいて考慮されねばならない。従って、校正ターゲットの正確な三次元対象物形状を知ることによ

50

て、校正は、当該 2 面に投影される各座標の各ペア間の三次元の対応を見つけて、レンズ収差を補償する。

【0097】

上述と全く同じ基本原理を使うことによって、カメラの内部モデルに関する交互の定式化が可能となる、例えば、回転前に原点 O における X_C 、 Y_C に平行な画像面上の x 、 y 軸に対する回転が、逆の順に幾何学的に適用され得る。上述のように、2 つの画像面が同一の視線を共有する場合、両画像の水平軸 x 同士との相対的な配置誤差を表現するために、 z 軸回転が、それらの 1 つに加えられ得る。

【0098】

1.3.3 レンズ収差モデル

一旦カメラ平面の傾き角度、 θ が適切に考慮されれば、カメラ画像は、レンズ軸 Z_c と完全に垂直な平面上で計算される、当該平面は、例えば、上述のように、検討される全ての面の視線であるレンズ軸 Z_c に対する垂直度を補正された $f = 1$ の平面、若しくは $f = f$ の平面である。ここで議論される技術は、 $f = 1$ の平面と $f = f$ の平面への投影を使用する撮像装置（例えば、カメラ）をモデル化するが、2 よりも多い平面がレンズ収差のモデル化に使用され得ることを理解すべきである。 $f = 1$ は、外部モデルにおける投影であり、 f は、画像面を定めるので、実際には、 $f = 1$ と f の各平面は、例示的に、最小要件である。幾つかの実施例において、1 以上の中間の平面が、 $f = 1$ と f の各平面の間にモデル化されてもよい。例えば、第 3 中間平面が、撮像素子の最小の焦点距離 f_{min} に、 $f = 1$ と f_{min} の各平面の間で計算される第 1 ホモグラフィーと $f = f_{min}$ と f の各平面間で計算される第 2 ホモグラフィーとを伴って、置かれてもよい。

【0099】

Z_c と直角の投影面に関して、レンズ収差モデルは、純粹に、幾何学的かつ色彩的な動径関数に減少させられ得る。

【0100】

多くの幾何学的レンズ収差のモデルが発表されている。幾人かの著者は、幾何学的レンズ収差の除去において $1/20$ 画素の精度を主張している。概して、それらの基本的な基準は、大体同じであり、実際に真っ直ぐな線は、一旦、幾何学的収差が除去された画像において真っ直ぐに見えるべきであるというものである。非常に僅かな著者しか、彼らのレンズモデルにおいて色収差を考慮していない。最も普及しているレンズの幾何学的収差のモデルは、非特許文献 3 に示されるように、Shawn Becker モデルである。

$$x' = x + x(k_1 r^2 + k_2 r^4 + k_3 r^6) + p_1(r^2 + 2x^2) + 2p_2 xy \quad (14)$$

$$y' = y + y(k_1 r^2 + k_2 r^4 + k_3 r^6) + p_2(r^2 + 2y^2) + 2p_1 xy, r^2 = x^2 + y^2 \quad (15)$$

ここで (x', y') は、像中心 (C_x, C_y) に対して計算された、点 (x, y) の新たな位置を表わしており、 k_1, k_2 および k_3 は、径方向の収差の 3 つの項であり、 p_1 と p_2 は、偏心収差の 2 つの項である。校正は、パラメータ k_1, k_2, k_3, p_1 、および p_2 の数値を得る。画像解析は、 (x', y') を与える。歪みがない (x, y) 位置は、二次元探索アルゴリズムを用いて 2 つの方程式を解くことによって見つけられる。

【0101】

たいていのレンズ収差モデルは、湾曲した線を真っ直ぐにできた。モデル化誤差は、校正されたステレオペアから三次元位置を復元する際に現れた。真っ直ぐに見える直線は、幾何学的収差の正確な補正を保証する基準としては不十分である。間違った透視は、画像全体の測定誤差を引き起こし、図 5 の傾き軸推定は、系統的な透視バイアスを生ずる。

【0102】

提案するカメラモデルの修正は、校正の正確さを増大させ、レンズの幾何学的収差モデルの複雑さを減少させる。Shawn Becker のレンズの幾何学的収差モデルのうちパラメータ k_1, k_2 のみが維持されるとともに、Shawn Becker の 2 つの方程式 (14)、(15) は、次の 1 つの方程式のみに減じられた。

$$r' = r + k_1 r^3 + k_2 r^5 + \dots \quad (\text{拡張可能}) \quad (16)$$

r が見つかると、完全径方向変位モデルから r' を知ることができ、 r における奇数項を

用いて拡張できる、ただし、 $r^2=x^2+y^2$ である。図7において見受けられるように、完全径方向変位モデルは、幾何学的収差が完全に径方向変位であるとモデル化できる場合に用いることができる。外部モデルの像点 (x, y) (例示的に、測定可能な量、例えば、画素よりも、インチ若しくはミリメートルで表現している)は、極座標 (r, θ) によって表現できる、ただし、 $r^2=x^2+y^2$ であり $\tan \theta = y/x$ であり、 x と y は、像中心に対して与えられる。

【0103】

ルックアップテーブル(LUT)によっても、方程式(16)を用いると、著しく少ないメモリを使用しつつ計算を4対1で減少させ、実時間計算に、さらに適した提案カメラモデルを作成できる。単純化されたモデルによっても、 $f=4\text{mm}$ のマイクロレンズ(視野角約90度)を備える640×480画素ベイパターンの1/3インチCCDのカラーカメラから、 10^{-10}mm の正確さで焦点距離 f を得ることができた。

10

【0104】

一旦、真の像中心が知られれば、色収差は、1つの像中心からモデル化できる。色収差について、幾つかの定式化が可能である：

- 1 - 緑チャンネルにおける幾何学的校正に基づく1つの中心；
- 2 - 赤、緑、及び青の各チャンネル独立の校正；
- 3 - 幾何学的校正に関する平均の赤、緑、及び青、色彩に関する赤と青の偏差。

【0105】

1.3.4 完全なカメラモデル

ここで、図8aを参照すると、提案のカメラモデルを用いて上記のように像点の位置を計算するための方法100が図示されている。画像面に位置する像点を与えるために、三次元点は、3つの変換を経る。方法100は、ステップ102における、提案のカメラの外部モデルを用いる $f=1$ の平面への投影、ステップ104におけるレンズ収差モデルの適用、およびステップ106におけるカメラの内部モデルを用いた傾いた画像面への投影を例示的に含んでいる。ステップ106が実行された後に、カメラによって撮影された三次元点 (X, Y, Z) に対応するカメラの像点の位置 (x', y') が得られる。

20

【0106】

ここで図8bを参照すると、ステップ102は、提案するカメラの外部モデルの変換を例示的に計算するとともに、ワールド座標系 (X_w, Y_w, Z_w) に対して表現された三次元点 P の座標 (X, Y, Z) のステップ106における受け取りを備えている。

30

【0107】

上述のように、対象物の三次元点の姿勢、すなわちカメラが対象物を見る角度および位置を与えられると、 $f=1$ の投影は、6自由度、すなわち、ワールド座標系 (X_w, Y_w, Z_w) と参照カメラ座標系 (X_c, Y_c, Z_c) との間の相対的な向きおよび位置を定義する3つの角度(

)と位置 (T_x, T_y, T_z) から、対象物の1対1の実スケール画像を与える。当該モデルパラメータ()、 (T_x, T_y, T_z) を用いて、上述のように、次のものが、ステップ108において同次座標において計算される：

$$P = [X \ Y \ Z \ 1]^T$$

【0108】

【数22】

40

$$[R_{3 \times 3} T_{3 \times 1}] = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} & T_x \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} & T_y \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} & T_z \end{bmatrix}$$

【0109】

r_{ij} , $i, j=1, \dots, 3$ は、ターゲットの姿勢角度()の関数であり、

$$[X' \ Y' \ Z']^T = [R_{3 \times 3} \ T_{3 \times 1}][X \ Y \ Z \ 1]^T$$

単位 Z' へのスケーリングは、外部モデルの像点 (x, y) を与える、ここで：

$$[x \ y \ 1]^T = [X' / Z' \ Y' / Z' \ 1]^T$$

50

≈

$[X' \ Y' \ Z']^T$

次に、外部モデルの像点がステップ 1 1 0 で出力される。

【0 1 1 0】

ここで図 8 c を参照すると、ステップ 1 0 4 におけるレンズ収差モデルの適用は、例示的に、ステップ 1 1 2 における外部モデルの像点 (x, y) の受け取りを備えている。各モデルパラメータ、すなわち、レンズの幾何学的収差パラメータ k_1 と k_2 とを用いて、ステップ 1 1 4 は、例示的に、 r, r' と、歪んだ像点 (x', y') との計算を備える。例えば、撮像装置の魚眼レンズに係る幾つかの実施形態においては、パラメータ k_1 と k_2 とが拡張されても良いことを理解すべきである。実際、上述のように、最も単純な形式においては、幾何学的収差は、完全に径方向の変位としてモデル化され得る。外部モデルの像点 (x, y) は、極座標 (r, θ) において表現され得る、ここで $r^2 = x^2 + y^2$ 、 $\tan \theta = y/x$ であり、 x と y は、像中心 $(0, 0)$ に対して得られる。 r を知れば、新しい歪んだ距離 r' は、次によって与えられる：

$$r' = r + k_1 r^3 + k_2 r^5 + \dots \text{ (拡張可能) },$$

ここで k_1 と k_2 とは、レンズの幾何学的収差パラメータである。が判るか、若しくは、同様の三角形の特性を用いることによって、歪んだ像点 (x', y') が、計算できる：

$$\begin{aligned} (x', y') &= (r' \cos \theta, r' \sin \theta), \\ \text{or } (x', y') &= (x r' / r, y r' / r) \end{aligned}$$

次に、ステップ 1 1 6 において、歪んだ像点 (x', y') が出力される。

【0 1 1 1】

一つの実施形態において、レンズ収差は、像中心 $(0, 0)$ に対する 1 対 1、 $f=1$ のスケールでモデル化される。しかし、以下にさらに述べるように、 f が、カメラの内部モデルと、 f スケールで取り扱われるレンズ収差とから、得られえることを理解すべきである。

【0 1 1 2】

ここで、図 8 d を参照すると、1 0 6 のカメラの内部モデルの取得は、ステップ 1 1 8 における歪んだ像点 (x', y') の受け取りを、例示的に、備えている。歪んだ像点 (x', y') と、カメラの内部モデルの 5 自由度、すなわち、 α と β (画像面の傾き角度)、焦点距離 f 、および像中心座標 (C_x, C_y) から、ステップ 1 2 0 において以下のものが計算される：

$$\begin{aligned} u &= f(\cos \alpha \sin \beta x' + \sin \alpha \sin \beta x' + \cos \alpha \cos \beta y' + \sin \alpha \cos \beta y' + \cos \alpha \cos \beta) \\ v &= f(\cos \alpha \sin \beta y' - \sin \alpha \sin \beta y' + \cos \alpha \cos \beta x' + \sin \alpha \cos \beta x' + \cos \alpha \cos \beta) \\ w &= -\sin \alpha \sin \beta x' + \cos \alpha \sin \beta x' + \sin \alpha \cos \beta y' + \cos \alpha \cos \beta y' + \cos \alpha \cos \beta \\ x'' &= (u/w + C_x) \\ y'' &= (v/w + C_y) \end{aligned}$$

ここで、 (x'', y'') はカメラの内部画像面上の像点であり、ステップ 1 2 2 において出力される。

【0 1 1 3】

上述のように、 f は、カメラの内部モデルから得られる。カメラの内部モデルの近似値を生成するために、小さい角度 θ と、近似値

$$\cos \theta \approx 1$$

および

$$\sin \theta \approx \theta$$

を用いることができる。サインとコサインの他の近似が可能であることを理解すべきである。方程式 (12) から下記にわかるように、代入すると、 h_{33} は、1 になり、 $h_{13} = f$ と $h_{23} = -f$ とは像中心の修正を生じ、 h_{11} と h_{22} とは、 f となって、 x, y における共通のスケールを与え、 $h_{12} = f$ は、像の傾きの等価物を生成する。以前に示されているように、 $h_{31} = -$ と $h_{32} =$ とは、0 になり得ない。それらは、像中心に対して測定された x と y に対する $w' = 1 + y^2 - x^2$ による再変倍の際に、像中心から x, y に沿って離れる透視の修

正を、像に与える。

【 0 1 1 4 】

【 数 2 3 】

$$H = \begin{bmatrix} f \cos \beta & f \sin \beta \sin \alpha & f \sin \beta \cos \alpha \\ 0 & f \cos \alpha & -f \sin \alpha \\ -\sin \beta & \cos \beta \sin \alpha & \cos \beta \cos \alpha \end{bmatrix} \approx \begin{bmatrix} f & f\alpha\beta & f\beta \\ 0 & f & -f\alpha \\ -\beta & \alpha & 1 \end{bmatrix} \quad (17)$$

【 0 1 1 5 】

さらに上述のように、レンズ収差は、画像面の f スケールに対してモデル化され得る。画像面のスケールに従ってレンズ収差をモデル化するためには、レンズ軸 Z_c と完全に垂直で、 Z_c に沿って f に位置し、中心 $(0, 0)$ を有する仮想の中間投影面がモデルに加えられる必要が有る。

【 0 1 1 6 】

【 数 2 4 】

$$\begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1/f & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X' \\ Y' \\ Z' \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X' \\ Y' \\ Z' \\ Z'/f \end{bmatrix} \Rightarrow \begin{bmatrix} fx \\ fy \\ f \\ 1 \end{bmatrix} \quad (18)$$

【 0 1 1 7 】

当該変換は、純粋なスケーリングホモグラフィー (scaling homography) S_f によって表現される

【 0 1 1 8 】

【 数 2 5 】

$$S_f = \begin{bmatrix} f & 0 & 0 \\ 0 & f & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (19)$$

【 0 1 1 9 】

カメラの内部モデルにおいて、 H から S_f を生成できる。 (fx, fy) を計算するために外部モデルの最後に S_f によるスケーリングを適用でき、 (fx, fy) をレンズ収差モデルに使用でき、それ故、カメラの内部モデルにおいて $f = 1$ に設定できる。次に、画像面が、修正されて、中心位置 $(0, 0)$ を有して、視線 Z_c と直角をなすように傾斜を戻されたかのように、レンズ収差パラメータが f スケールで計算される。

【 0 1 2 0 】

レンズ収差のモデル化における要件は、視線に対して完全に垂直な平面に関して、像中心に対する径方向の距離を計算することである。これは、固定レンズのモデリングに追加の自由度を与える、しかし、レンズ収差の $f=1$ 、1 対 1 の実スケールのモデリングは、レンズ収差パラメータを f から独立させる、ズームレンズに対する利点である。

【 0 1 2 1 】

ここで図 9 a を参照すると、撮像素子のモデル化および校正のためのシステム 2 0 0 が描かれている。システム 2 0 0 は、ネットワーク 2 0 4 を経てアクセス可能な 1 以上のサーバー 2 0 2 を備える。例えば、ウェブサーバー、アプリケーションサーバー、およびデータベースサーバーに対応した一連のサーバーが使用される。これらのサーバーは、全て、サーバー 2 0 2 により表されている。サーバー 2 0 2 は、ネットワーク 2 0 4 を通じて通信に適合する複数の装置 2 0 6 のうち 1 つを使うユーザーによってアクセスされる。装置 2 0 6 は、パーソナルコンピュータ、タブレットコンピュータ、携帯情報端末、およ

10

20

30

40

50

びスマートフォンなどの装置を備え、インターネット、公衆交換電話網、セルラーネットワークその他の当業者に知られたネットワーク 204 を通して通信可能に構成されている。サーバー 202 は、各装置 206 から遠くに別個に設けられているように描かれているが、サーバー 202 が、ダウンロードされたソフトウェア、ファームウェアアプリケーション、若しくはそれらの組合せとして各装置 206 と統合されてもよいことを理解すべきである。また、複数の装置 206 のうち幾つかの装置が同時にサーバー 202 にアクセスしてもよいと理解すべきである。

【0122】

撮像データは、校正およびデータ収集に用いられる撮像装置 207 によって獲得され得る。装置 207 は、装置 206 と（描かれているように）別体でもよいし、統合されていてもよい。当該撮像データは、以降にさらに述べられる校正ターゲットのような実際のワールド三次元対象物（不図示）の 1 以上の画像を含んでいてもよい。次に、当該撮像データが、サーバー 202 において処理されて、撮像装置 207 のモデルが、図 8 a、図 8 b、図 8 c、および図 8 d と関連して上述された手法によって取得される。撮像データは、空間での動きがモニタされている移動対象物のような対象物について、例示的に、実時間（例えば、毎秒画像 30 枚の速度）で取得される。次に、サーバー 202 は、撮像データを処理し、取得された各画像に関して像点を決定する。あるいは、撮像データは、画像中の 1 以上の注目点のそれぞれと関連づけられた像点を決定するために処理される。

【0123】

サーバー 202 は、他の物のうち、メモリ 210 と組み合わせられて当該メモリで動作する複数のアプリケーション 212 a ~ 212 n を有するプロセッサ 208 を備えてもよい。ここで表示されてるアプリケーション 212 a ~ 212 n は、別々のものとして描かれ述べられているが、結合されるか、若しくは種々の手法で分けられてもよいことを理解すべきである。

【0124】

1 以上のデータベース 214 が、メモリ 210 に直接統合されてもよいし、分けて、（描かれているように）サーバー 202 から遠方に設けられてもよい。データベース 214 への遠隔アクセスの場合には、上に示されたように、何れかのタイプのネットワーク 204 を介してアクセスがされる。ここで述べられた種々のデータベース 214 は、コンピュータによる高速な検索及び取得のために編成されたデータ若しくは情報の集合として与えられる。データベース 214 は、種々のデータ処理操作におけるデータの保存、取得、変更、および削除を容易にするために構成されている。データベース 214 は、各レコードに分けられる 1 つのファイル若しくは、ファイルの集合から成ってもよく、各レコードは、1 以上のフィールドからなる。フィールドを素早く、検索し、再編成し、グループ化し、そして選択するために、データベースの情報は、キーワードと仕分けコマンドとを使用する問い合わせを通じて取得される。データベース 214 は、1 以上のサーバーのようなデータ格納媒体におけるデータのどのような編成物であってもよい。

【0125】

1 つの実施形態において、データベース 214 は、セキュア・ウェブ・サーバーと、データへのアクセスに使用されるプロトコルであるトランスポート・レイヤー・セキュリティ（TLS）をサポート可能なハイパーテキスト・トランスファー・プロトコル・セキュア（HTTPS）である。当該セキュア・ウェブ・サーバーとの間での通信は、セキュア・ソケット・レイヤー（SSL）を使用して安全にされる。ユーザーの本人確認は、全てのユーザーについて、各ユーザー名と各パスワードとを使用して行われる。種々のレベルのアクセス権が、多様なレベルのユーザーに付与される。

【0126】

あるいは、コンピュータネットワーク内の装置に情報交換を可能とする既知の各通信プロトコルのどれかが使用されてもよい。各プロトコルの例として以下のものが挙げられる、IP（インターネット・プロトコル）、UDP（ユーザー・データグラム・プロトコル）、TCP（トランスミッション・コントロール・プロトコル）、DHCP（ダイナミッ

10

20

30

40

50

ク・ホスト・コンフィギュレーション・プロトコル)、HTTP(ハイパーテキスト・トランスファー・プロトコル)、FTP(ファイル・トランスファー・プロトコル)、Telnet(テルネット・リモート・プロトコル)、SSH(セキュア・シェル・リモート・プロトコル)。

【0127】

プロセッサ208がアクセス可能なメモリ210は、データを受信し、格納する。メモリ210は、高速ランダム・アクセス・メモリ(RAM)などのメインメモリ、又は、ハード・ディスク、フラッシュ・メモリ、若しくはマグネティック・テープ・ドライブなどの補助記憶装置であってもよい。メモリ210が、リード・オンリー・メモリ(ROM)、イレーサブル・プログラマブル・リード・オンリー・メモリ(EPROM)などの他のタイプのメモリ、又はビデオディスク若しくはコンパクト・ディスクなどの光学記憶媒体であってもよい。

10

【0128】

プロセッサ208は、メモリ210にアクセスし、データを取得する。プロセッサ208は、データの操作ができるどのようなデバイスであってもよい。例は、中央処理装置(CPU)、フロント・エンド・プロセッサ、マイクロプロセッサ、およびネットワーク・プロセッサである。アプリケーション212a~212nは、プロセッサ208と組み合わされており、以降により詳細に説明する種々のタスクを実行するように構成されている。出力は、各装置206に送られる。

【0129】

20

図9bは、プロセッサ208において実行されるアプリケーション212aの典型的な実施形態である。アプリケーション212aは、撮像装置207から撮像データを受け取って、撮像装置207によって撮影された実三次元ワールド対象物の点の座標を取得する受信モジュール302と、図8bに図示され述べられた方法を可能とする外部モデル投影モジュール304と、図8cに図示され述べられた方法を可能とするレンズ収差補正モジュール306と、図8dに図示され述べられた方法を可能とする内部モデル投影モジュール308と、内部モデル定義モジュール308によって計算された、カメラの像点の座標を出力する出力モジュール310とを備える。

【0130】

2.0 校正

30

ここで、図10、図11、および図12の、三次元から二次元画像を生成する処理の校正モデルを参照する。2台の校正されたカメラから、二次元から三次元へのステレオペアの逆操作が用いられてモデルの正確さが確認される。

【0131】

2.1 実験の構成

提案する実験の構成は、たとえ、低解像度の短波長赤外線(SWIR)撮像装置を用いても、現場で使用可能であることを目的としている。図10に図示されるように、90度をなす、2つの黒色のアルマイト処理されたアルミニウム(不図示)の平面上に、短波長赤外線スペクトルの表面放射特性を変化させるとともに、カラー校正用の白黒情報を与える、2つの円格子(不図示)が形成されている(例えば、彫られている)。

40

【0132】

発表された幾つかのアプローチは、収差を避けて幾つかのカメラパラメータを分離するために画像の中心部分を使用する。あいにく、それは、パラメータ評価のバイアスも生ずる。提案するアプローチにおいては、画像のどこで取得されるどのような楕円の中心も、モデルに当てはまる。それ故、提案するモデルは、広角レンズに対しても、画像全体にわたって正確である。

【0133】

一度、画像から各楕円の中心が測定された場合には、三次元の実ワールドのターゲット位置と、画像におけるそれらの二次元の対応する位置とを関係づけるデータセットが得られる。それらを相互に関連づけるカメラモデルを用いて、Levenberg-Marquardtの探索ア

50

ルゴリズムが各モデルパラメータを計算するために使用される。Levenberg-Marquardt アルゴリズム以外のアルゴリズムが適用され得ることを理解すべきである。例えば、最急降下アルゴリズム、若しくはニュートンアルゴリズムが使用され得る。提案される技術により達成される精度の向上は、バイアス無しで、最小 2 乗誤差和の基準の使用を可能とした。誤差は、モデルと三次元データセットから予想されるターゲット位置から、対応する二次元の実際の像の測定値を引いたものとして定義される。

【0134】

校正ターゲットは、2 インチの中心間の間隔で設けられた直径 1 インチの複数の円を用いる。複数の円を用いることにより高画素の画像に対しても、コーナーが検出されないことが保証される。

10

【0135】

各円は、バイアスも、エッジのいかなる優先の向きも無しで、カメラの挙動の局所評価を与える。我々は、エッジ検出の信号対雑音 (S/N) 比よりも、正確な楕円中心位置精度に関心を持っている。楕円のモデル化と中心バイアスの評価とに関する種々の技術の試験に多くの労力を要した。画像は、高画素であるので、エッジ検出器の測定領域は、例示的に、 3×3 画素の領域に限定される。

【0136】

提案する技術は、低解像度のカメラでの使用を意図しているので、図 11 に示されるような、 $f = 4 \text{ mm}$ のテスト用レンズを備えた 640×480 画素のベイヤー・パターン・ポイント・グレイ・リサーチ・ファイアフライ・カラーカメラ (Bayer Pattern Point Grey Research Firefly colour camera) が、例えば、選択される。

20

【0137】

最終的に、モーメント技術は、まぶしい光と反射を扱えず、それゆえ現場での校正に使用できないと結論づけられた。幾つかのケースで、 $1/4$ 画素 $\sim 1/2$ 画素の中心のバイアスが見られた。これらの誤差は非常に小さく、これらを形状復元処理から取り除くために、広範な数学的解析が必要であった、そして、これらは、人の眼には見えない。

【0138】

一方、エッジ勾配センシング技術は、エッジの向きが水平若しくは垂直のカメラの格子画素配列と並ばないときには、サブピクセルの位置のバイアスを示した。結局、Devernay (非特許文献 1) による「非マキシマ抑制 (Non Maxima Suppression)」のサブピクセルへの拡張によるサブピクセルの修正が使用された。2 段階処理において、ステップ 1 は、エッジの向きのバイアスの補正を加えて、エッジ点の初期推定値を復元した。この初期セットにおいて、楕円形状の初期推定値が計算される。ステップ 2 において、初期楕円の当てはめが局所的な湾曲の評価と、エッジ位置の修正とに用いられる。

30

【0139】

2.2 校正結果

下記の表 1 に示されるように、同一の実験データを用いて、2 つのカメラモデルについてパラメータの推定値が比較されている。

【0140】

【表 1】

omega(z):	3,13369E+00	rad	179,5472	°	3,13212E+00	rad	179,4574	°
phi(y):	-8,14667E-01	rad	-46,6770	°	-8,14619E-01	rad	-46,6742	°
kappa(x):	8,43958E-03	rad	0,4836	°	8,71144E-03	rad	0,4991	°
Tx:	-4,73799E+01	mm	-1,8654	in	-4,76618E+01	mm	-1,8764	in
Ty:	2,38080E+02	mm	9,3732	in	2,40577E+02	mm	9,4715	in
Tz:	9,81422E+02	mm	38,6387	in	9,78513E+02	mm	38,5241	in
Cx:	2,22866E-01	mm	359,7976	pixel	2,24170E-01	mm	360,0303	pixel
Cy:	1,70224E-01	mm	270,3972	pixel	1,59918E-01	mm	268,5568	pixel
a:	3,92269E+00	mm	3,9227	mm	3,91093E+00	mm	3,910931	mm
b:	3,92154E+00	mm	3,9215	mm	3,91093E+00	mm	3,910931	mm
s:	8,80439E-04	mm	0,0009	mm	8,00000E-11	mm	0,000000	mm
k1:	-4,15502E-01		-0,415502		-4,16424E-01		-0,416424	
k2:	1,78838E-01		0,178838		1,80131E-01		0,180131	

10

【0 1 4 1】

一番左のカメラパラメータセットは、我々自身の実験データを用いてテストされた、発表されている最も正確なモデルから得られている。一番右のセットは、提案するモデルから計算された、ここで、レンズモデルは、純粋に、径方向の幾何学的収差であるとされている、そして、カメラの内部モデルは、提案する実装を用いた。

【0 1 4 2】

上記表における最初の6行は、カメラの外部パラメータ、すなわち、 $[R_{3 \times 3} \ T_{3 \times 1}]$ の計算に必要な3つの角度と、3つの位置である。次の5行は、カメラの内部パラメータであり、我々は、我々のパラメータの表現を、図5の一般的に使用されているモデルに合うように修正した。我々の自由度は、異なる数学的定式化を使用する。次に、残りの2行は、主要なレンズの幾何学的収差のパラメータ k_1 と k_2 を示している。これらの2つは、多くのモデルにみられ、たいていの魚眼の幾何学的収差を説明するものである。

20

【0 1 4 3】

上で論じられたように、 a 、 b 、および s から、カメラ画素の直角度と、焦点距離 f における誤差とを表現するように、我々は、 $a = b = f$ で $s = 0$ を考慮した。もしも画素が正方形であれば、高さスケールは、幅スケールと等しく、双方は、完全に直角であり、 $a = b = f$ は、画像スケールを表現する。

30

【0 1 4 4】

提案されるモデルへ切り替えたことにより、 f の誤差は、 10^{-3} mmから 10^{-10} mmに減少した。当初、焦点距離 f は、0.03%誤差があった。これは、小さく見えるが、当該モデルバイアスは、像中心(C_x, C_y)を主にY方向に沿って2画素近く移動させた。同時に、全ての外部パラメータも移動した。全ての角度が変化し、対象物距離 T_z は、0.3%間違っている。 f の誤差に対して、距離測定の誤差は、10倍に増幅される。それは、系統的な距離測定誤差である。1 mの距離に付き3 mmの誤差は、10 kmの距離について30 mに拡大される。 T_x と T_y の誤差率も、悪化しており、一番左のモデルがレンズ軸 Z_c に沿った距離を維持しようと努めることを示している。校正されたステレオペアに基づいて、三次元の復元は、画像スケールにおいて2画素に相当する誤差を示す。ステレオ三次元測定について、さらに以降において、さらに論ずる。

40

【0 1 4 5】

収差パラメータ k_1 と k_2 とを考慮すると(k_1 の負号は、樽形収差を意味している)、双方が、過小評価されていることが判る。像中心から離れるにつれて、いくらかの除去できない湾曲がある。それは、一画素よりも小さいかもしれないが、複数の写真から地図を作るために画像をつなぎ合わせようとすると、湾曲は増加する。

【0 1 4 6】

3.0 モデル/校正のバイアスの影響

主なモデルバイアスの影響は、三次元スキャナーのアプリケーションに使われるような、ステレオペアに基づく三次元遠隔測定法に現れる。基本的に、数学的な三角測量処理が

50

同じであるため、移動カメラに基づく三次元抽出にも同じ結論が当てはまる。

【0147】

3.1 ステレオペアに基づく三次元の復元

前もって言及したように、カメラモデルにおける提案の修正をしないと、三次元の三角測量の系統的誤差を生ずる。図13は、カメラで同時に撮影した2つの画像を用いて、三次元対象物の測定に一般に使用されるステレオペアを示している。三角測量についての詳細な考察は、非特許文献5に与えられている。

【0148】

図4に示されるように、 O と O' とは2つのカメラ（不図示）の光学中心であり、双方のレンズ軸は、各像中心における各画像面に直角にそれぞれ突出している、各像中心は、それぞれ、 (C_X, C_Y, f) と (C_X', C_Y', f') （明らかにつき不図示）であり、ここで、 (C_X, C_Y) は、画像面の原点であり、 f は、 O と画像面との距離である。同様に、 (C_X', C_Y') は、画像面の原点であり、 f' は、 O' と画像面との距離である。

10

【0149】

双方のカメラは、対象物（不図示）上の共通の点 M を見ている。 M は、双方のカメラ画像に点 m 、 m' として投影している。

【0150】

空間において M がどこにあるかを見つけるために、 O 、 O' をそれぞれ起点とし、それぞれのカメラの像点 m 、 m' を通る2つの直線がそれぞれ伸ばされている。 M は、双方の直線の交点として計算される。

20

【0151】

三次元の精度は、以下のものの正確な知見に依存する：

1. 光学中心 O と O'
2. 焦点距離 f と f'
3. 像中心 (C_X, C_Y) と (C_X', C_Y')
4. レンズ軸の向き Z_C と $Z_{C'}$
5. 像点 m と m' の正確さ
6. OM と $O'M$ との交点

三次元遠隔測定の正確さに関する最初の4つの要件は、カメラの校正を通して見つけれられる、5番目の要件は、サブピクセルの画像の特徴抽出によって見つけれられる。最後の要件は、三角測量の三次元の復元そのものである。

30

【0152】

最初の4つ、すなわち、光学中心 O と O' 、焦点距離 f と f' 、像中心 (C_X, C_Y) と (C_X', C_Y') 、およびレンズ軸の向き Z_C と $Z_{C'}$ の上述の誤差依存性は、カメラモデルの発見された上述のバイアスの影響を受ける。

【0153】

傾き軸推定は、焦点距離 f について非常に小さい誤差を生ずる一方、像中心 (C_X, C_Y) と焦点 O と O' に大きなバイアスを生ずる。 O と O' の位置がずれているので、 M を見つけるための三角測量は、系統的な三次元誤差を与える。提案する校正の例によれば、光学中心 O と O' の2画素の誤差は、像点 m と m' のいかなる測定誤差をも支配する、なぜなら我々は、それらを1/4画素の精度で取得できたからである。

40

【0154】

特徴点（ m と m' ）抽出は、エッジの向きのバイアスの影響を受け、コーナー検出のバイアスは、校正において処理されなければならない。

【0155】

そして、最終的に、古典的な特異値分解（SVD）アプローチが、その安定性とスピードを目的に、実行された。2つの直線が空間で交差する保証は何らされない。それ故、 M は、双方の直線が最も近くなる空間中の点として見つけれられる。

【0156】

我々の研究の過程で、精度に影響する幾つかのバイアス源が、主要な原因であるカメラ

50

モデルのバイアスとともに、測定された。バイアス源は、以下のものを含んでいる：

- カメラ / レンズ モデル (像中心(C_x, C_y)における 2 画素誤差)
- サブピクセルのエッジの向きのバイアス (1 / 4 画素のエッジシフト)
- サブピクセルのコーナー検出バイアス (1 / 4 画素のコーナーずれ)
- 未考慮の色収差 (色に関する 1 / 2 画素のエッジシフト)
- 十分に補償されていない幾何学的収差 (容易に検出できない 1 / 2 画素の除去できない湾曲)
- サブピクセルレベルでの J P E G 画像フィルタリング (J P E G 質パラメータによって可変)

カメラモデルのバイアスとは別に、たいていのバイアス源は、特徴点抽出の誤差を生ずる。これらのバイアス源を除去することは利点の蓄積となる。広角のマイクロレンズを備えた低解像度のベイヤ・パターンカメラからでさえ、単にカメラの内部モデルを変更することによって 10^{-10} mm の精度で f を得ることは、大幅な改良を示し、今まで何故正確なズームレンズモデルが不可能であったのかを説明する。

【 0 1 5 7 】

3 . 2 モデルのバイアス：全体とズームレンズ

上述のように、すべてのレンズパラメータは、傾き軸推定と称されるカメラの内部モデルのバイアスによって「汚染」されている。当該バイアスは、傾き推定を、カメラの三次元内部画像面の正確な透視モデルに変更することによって除去できる。

【 0 1 5 8 】

ステレオカメラ若しくは移動カメラに基づく三次元の三角測量において、影響は、画像スケールと像中心とが悪いので、三角測量がシフトされることである。

【 0 1 5 9 】

表 1 に描かれた例は、レンズ収差パラメータは、小さく見積もられており、樽形収差を意味する負号の k_1 を伴うことも示す。複数の画像をつなぎ合わせて地図を作るときには、それは画像から画像への増大する湾曲を生ずる。

【 0 1 6 0 】

カメラは変倍された寸法を与えるので、範囲と照準の測定値もまたバイアスされるとともに、焦点距離 f の誤差の割合に関連づけられる。

【 0 1 6 1 】

それは、また、ズームレンズカメラの正確なモデル化を妨げる。ズームレンズにおいて、焦点 O は、レンズ軸 Z_c に沿って移動する。校正に基づいて、画像面に対して直角に f 離れた像中心(C_x, C_y)を知ることによって、 O が見つけれられる。提案の例は、これらのパラメータにおける系統的なバイアスを示す。レンズ機構における芯振れを考慮すると、芯振れはレンズ軸 Z_c を動かすので、バイアスがさらに悪化する。

【 0 1 6 2 】

カメラモデルに対して、提案する修正をしない場合、ズームレンズのモデル化は不可能になる。

【 0 1 6 3 】

ズームレンズカメラのモデル化は、空間における焦点 O の変位のプロットを要する。理想のズームレンズは、レンズ軸 Z_c 上の直線に沿って移動する O を有し、 $f=1$ の入射平面も移動する。メカ的な組み立て誤差が発生すると、直ちに、点 O の直線変位関係も崩れる。ズームレンズのメカ的な品質を評価する唯一の方法は、それ故、像中心(C_x, C_y)と f の正確な知見に依存する。

【 0 1 6 4 】

メカ的な上質の挙動は、また、ズームレンズの矛盾点：すなわち、レンズ機構における組み立て公差のために精度を失うという代償を払って、必要時に追加的な精度を得るためにズーム拡大することである。

【 0 1 6 5 】

3 . 3 幾何学的収差の除去例

10

20

30

40

50

ここで図 1 4 を参照すると、上述の予め校正されたテストカメラを用いるとともに、レンズの幾何学的収差が方程式 (1 6) のように表現されている提案するアルゴリズムに基づいて、どのように画像からレンズ収差が除去されるのかを図 1 4 は示している。色収差は、白黒画像上では見ることができない。

【 0 1 6 6 】

3 . 4 色収差

次に、焦点距離 4 mm の Cosmocar (登録商標) の C マウントレンズの色収差を図示する図 1 5 を参照する。一旦、真の像中心 (C_x, C_y) が判ると、色収差がモデル化できる。たいていの画像において、被写体が完全な白黒でなく、カラーカメラで撮影されない場合は、色収差は殆ど見られない。非特許文献 2 は、各 R G B カラーチャンネルがそれぞれ独立にモデル化されているモデルを提供する。

【 0 1 6 7 】

図 1 5 において、色収差によるターゲットの変位は、5 0 倍に拡大されて示されている。ターゲットの各位置は、赤、緑、および青 (RGB) のカメラのカラーチャンネルに対して示されており、3 つの集合に分類されている。‘ x ’ 若しくは十字のマーカー記号は、青色でのターゲットの抽出を示し、‘ + ’ 若しくはプラス符号のマーカー記号は、赤色でのターゲットの抽出を示し、ドット若しくは点のマーカー記号は、緑色でのターゲットの抽出を示している。可視スペクトルの拡がりは、緑色ターゲットに対して赤色ターゲットの中心を外側に、青色ターゲットの中心を内側に配置する。図 1 5 のグラフは、ほとんどが径方向の挙動を示す。各想像線は、座標 (500 , 400) の近くに円で囲まれたプラス符号のマーカー記号により示される像中心に向けて整列するどのターゲット位置に対しても赤、緑、および青の中心をそれぞれ接続する。

【 0 1 6 8 】

図 1 6 と図 1 7 にそれぞれ示される次の 2 つのグラフは、予想されるように、縦座標の原点 (0 , 0) から始まっており、青と赤の双方の色収差が像中心において零であることを示している。レンズの理論上の挙動から予想されるように、色収差は、像中心において零となるべきである。

【 0 1 6 9 】

青色収差と赤色収差の双方が、像中心から径方向の異なる各距離においてピーク値をそれぞれ有している。± 1 / 2 画素より大きいものから ± 1 / 8 画素未満のものまで、色収差はモデル化され得る。

【 0 1 7 0 】

像中心 (C_x, C_y) から設定される極座標において、考慮されていない色収差が ± 1 / 2 画素の誤差を、対象物の色が変わるか、若しくは光源のスペクトルが変わるエッジ位置で生ずる。これは、エッジ検出が色に対してバイアスされるので、ベイヤ・パターンのカラー画像から R G B を抽出する際には注意しなければならないことを強調している。

【 0 1 7 1 】

3 . 5 ベイヤ・パターンの復元

ここで、図 1 8 を参照すると、ベイヤ・パターンのカラーカメラは、R、G、若しくは B が前に付いた図 1 8 の画素番号で示される赤、緑、若しくは青の各画素に対して 1 つのカラー信号を付与する。失われたカラー情報は、隣接画素の情報をを用いて補間される。

【 0 1 7 2 】

最も正確なベイヤ・パターンの補間方式は、失われた R G B 情報を回復させるためにエッジ検出を用いる。正確なベイヤ・パターンの復元は不連続性を避ける必要があるので、エッジを越える補間はできない。

【 0 1 7 3 】

2 段階処理において、最初に、失われた G 画素値が B と R の画素において計算される。例えば、赤画素 R 1 3 において、失われた G 1 3 の値は、次のように計算される：もしもエッジが水平であれば

$$(G_{12}+G_{14})/2 \quad (R_{13} > (R_3 + R_{23})/2) \quad (11)$$

10

20

30

40

50

もしもエッジが垂直であれば

$$(G8 + G18)/2 \quad (R13 > (R11+R15)/2) \quad (12)$$

そうでなければ

$$(G12+G8+G14+G18)/4 \quad (13)$$

ステップ 2 において、B と R のエッジが G エッジと同じ画像面の場所で幾何学的に見つけられると仮定して、失われた B 値および R 値が、エッジ検出のために既知の G を用いて計算される。

【 0 1 7 4 】

レンズには色収差があるので、ベイヤ・パターンの復元は、B 画素から G 画素、R 画素にスキャンする際に「色シフト」するエッジ位置を補償するように適合することを必要とする。

10

【 0 1 7 5 】

3. 6 光学系設計のトレードオフ

監視、三次元遠隔測定法、およびスキャナーに関して、カメラ校正のバイアスを除去する必要性が示された。当該技術の他の重要なものは、以下を含むが、これらに限定されない：

1. オープン統合アーキテクチャを構築するためのソフトウェアによるアプローチ；
2. 広角レンズの使用の許容、若しくはレンズサイズの削減；
3. ズームレンズカメラのモデル化の許容；
4. 計算速度が速く、損失のない画像圧縮の追加する画像の幾何学的収差および色収差の補正アルゴリズム；
5. 色収差により生ずるベイヤ・パターンの復元誤差の除去。

20

【 0 1 7 6 】

ソフトウェアが、カメラのハードウェア性能を越えて精度を向上できる唯一の戦略であると思われることに留意されたい。

【 0 1 7 7 】

イネーブラとして、当該技術は、以下を許容する：

- ・精度を損なうことなくカメラの視野角を増加させる広角レンズの使用。1 / 3 インチ C C D と $f = 4\text{mm}$ レンズとの組合せは、90 度の視野角を与える。
- ・色収差のモデル化と、スペクトルにわたるサブピクセルのエッジ測定を加えることによるカメラの低解像度の補償。
- ・小型化：我々は、マイクロレンズを使用する校正と、略水素分子の大きさである 10^{-10}mm の精度の焦点距離の評価とを成し遂げた。
- ・S W I R、カラー合成画像、レーダー、および L I D A R 間のセンサの融合：正確な融合を達成するために、各画像スケールと像中心が知られる必要があり、画像の収差は除去される。

30

【 0 1 7 8 】

デジタル画像の遅れは、4 対 1 の低減が望ましい提案される幾何学的収差の除去を行う観察者に吐き気を催させる。校正バイアスに基づく除去できない 3 D 誤差もまた、頭痛、若しくはコンピュータ関連の病気などの人の不快感の原因となる。兵士用ビジョンのための視野の増幅のテストは、画像合成の実際の 1 / 4 秒の遅れは、人に吐き気をおこし得ると結論づける。

40

【 0 1 7 9 】

解決手段は、実装されたソフトウェアであるので、クロスプラットフォームに依存しなくなる。

【 0 1 8 0 】

低解像度画像において、サブピクセルのエッジ抽出とプロットとは、人の脳が画像を理解する助けになる。低解像度の S W I R 画像は、高解像度のカラー画像と融合され得る。

【 0 1 8 1 】

拡張現実において、コンピュータ生成画像は、理想的な透視と既知の焦点距離とを有し

50

ている。コンピュータ生成画像は、 f の設定値に基づいて生成されており、完全にピンホールであるので、収差のためにカメラ画像を修正する必要も、合成画像と同じスケールに当てはめる必要もない。

【0182】

衛星からの地球の観測と監視において、どのレンズも、ある程度のレベルの収差を示すであろう。地球の大気は、また、レンズ収差が正確に分かっているときにのみ、補償可能な収差を加える。画像をつなぎ合せるときに、十分に補償されていない幾何学的収差は、湾曲を増加させ、傾き軸推定により生ずるバイアスされた透視は形状の変形、すなわち、直角度の喪失、鉛直度の喪失を生ずる。

【0183】

サブピクセルのエッジ抽出は、飛び抜けて、最も効果的な画像圧縮方法である。画像のレンズ収差の補正と、J P E G の改善とによって、30%増加された損失のない画像圧縮が示された。

【0184】

提案されたアプローチは、ズームレンズの遠隔測定法に望ましいものであり、広角レンズのアプリケーションにおいて速度と精度とを増加させるとともに、2つの方法でシステムの小型化を可能とする。小型化は、第1に、より小さいレンズ系に基づいて追加の正確さを付与することにより可能とされ、第2に、光学系の簡素化を可能とする、ソフトウェアを介したフィルタリングによって可能とされる。

【0185】

これは、精度、速度、コスト、大きさ、重量、メンテナンス、およびアップグレード性のための最良のトレードオフを提供する。

【0186】

4.0 結論

その機器よりも正確な自動システムは無い。知的システム (IS) において、デジタルカメラを測定器として使用するためには、当該カメラの校正が必要である。

【0187】

市販のレンズは、焦点距離 f に10%の公差を有し得るので、追加される精度は、ソフトウェアを通してのみ達成される、そしてはソフトウェアは、サブピクセルレベルでレンズ収差を補償する唯一の手段である。

【0188】

傾き軸推定は大きなバイアスを生じるので、カメラの画像面の三次元形状：すなわち、水平方向と垂直方向の画像スケールが等しく直角であること、を維持する画像面の透視モデルに置き換えられる必要が有る。像中心がずれているため、傾き軸推定は、三次元の三角測量に現れる校正バイアスを導き入れてしまう。上述の例では、2画素の像中心のバイアスが、三角測量処理における他の全ての誤差を支配する、何故なら、画像の特徴点は、1/4画素の精度で抽出されるからである。

【0189】

幾つかのサブピクセルのバイアスが生じ得るため、校正のための画像の特徴点の抽出においては、注意する必要が有る。サブピクセルのバイアス源は、以下のものを含むが、限定されるわけではない：

- サブピクセルのエッジの位置と向きとのバイアス；
- サブピクセルのコーナー検出バイアス；
- 考慮されていない色収差；
- 十分に補償されていない幾何学的収差；
- サブピクセルレベルでのJPEGの画像フィルタリング。

【0190】

ズームレンズのレンズ焦点の変位を特定するためには、カメラの内部画像面に関する透視モデルが必要である。ソフトウェアによる補正手法は、広角レンズのアプリケーションにおいて速度と精度を増大させ、2つの方法でシステムの小型化を可能にする。小型化は

10

20

30

40

50

、第１に、より小さいレンズ系に基づいて追加の正確さを付与することにより可能とされ、第２に、光学系の簡素化を可能とする、ソフトウェアを介したフィルタリングによって可能とされる。ソフトウェアによるモデル／校正は、ハードウェアの制限を超えて、カメラの性能を向上させるための唯一の手法である。

【０１９１】

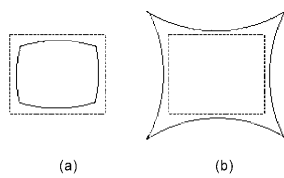
ブロック図において、異なるデータ信号接続を介して互いに通信し、個別の各構成要素を含む各グループとして図示されているが、本実施形態はハードウェアとソフトウェア構成要素との組合せによって提供され、幾つかの構成要素は、ハードウェア若しくはソフトウェアシステムの所定の関数若しくは操作により実装され、図示されているデータ経路の多くは、コンピュータアプリケーション若しくはオペレーティングシステム内でのデータ通信によって実装されているとことが、当業者によって理解されるであろう。図示されている構成は、本実施形態の教示効率のために、このように与えられている。

【０１９２】

本発明は、方法として実施可能であり、システムおよび／若しくはコンピュータが読取り可能な記憶媒体において具現化され得ることに留意すべきである。上述した本発明の実施形態は、例示のみを目的としている。それ故、本発明の範囲は、添付の特許請求の範囲によってのみ限定される。

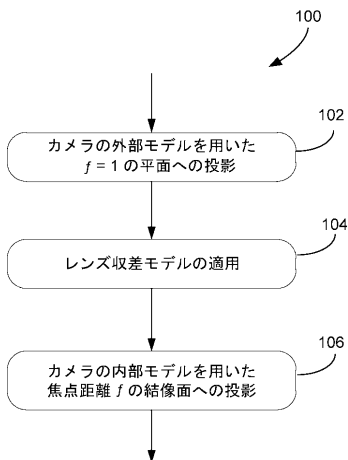
10

【図２】

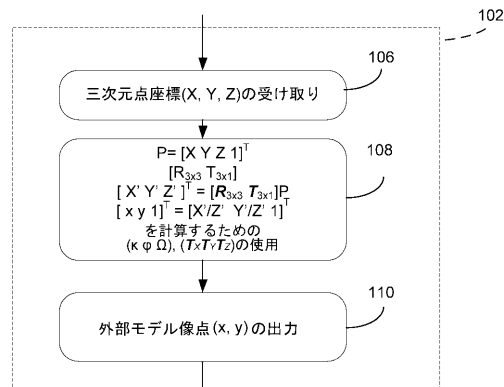


従来技術

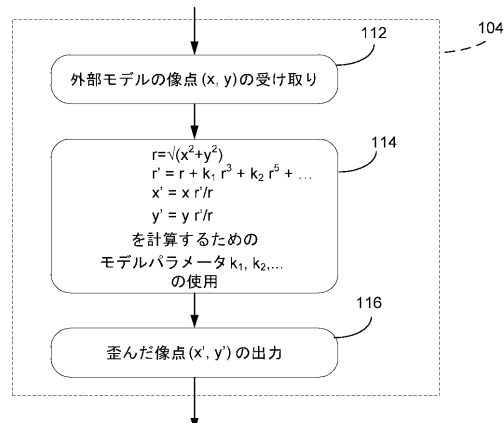
【図８ａ】



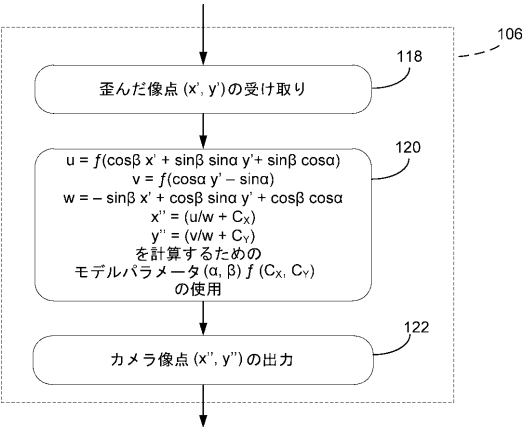
【図８ｂ】



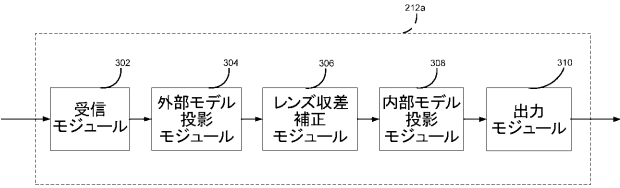
【図８ｃ】



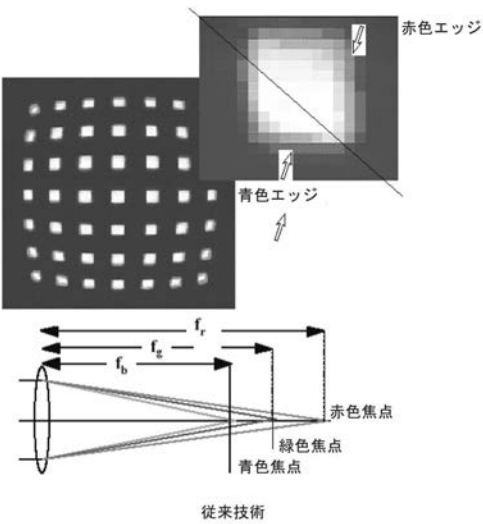
【 図 8 d 】



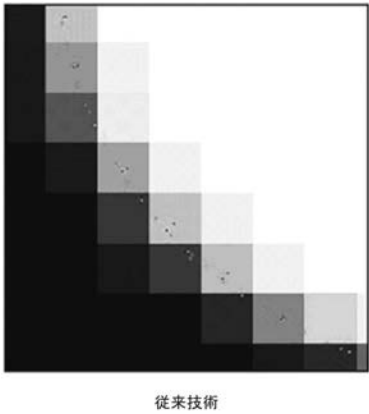
【 図 9 b 】



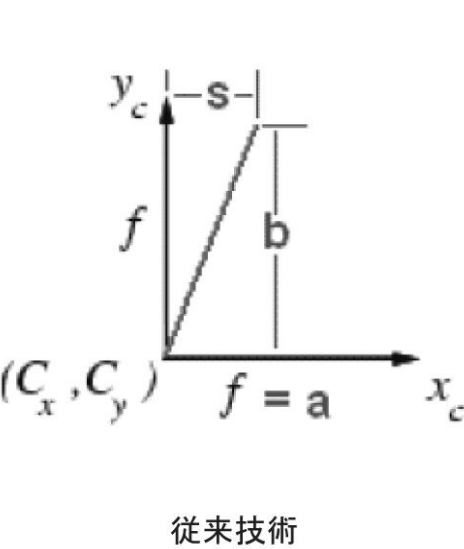
【 図 1 】



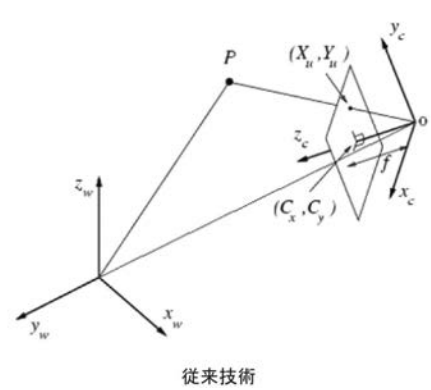
【 図 3 】



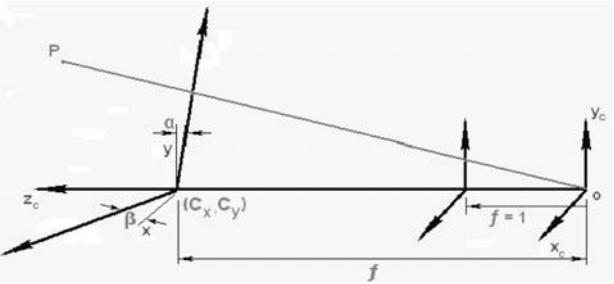
【 図 5 】



【 図 4 】



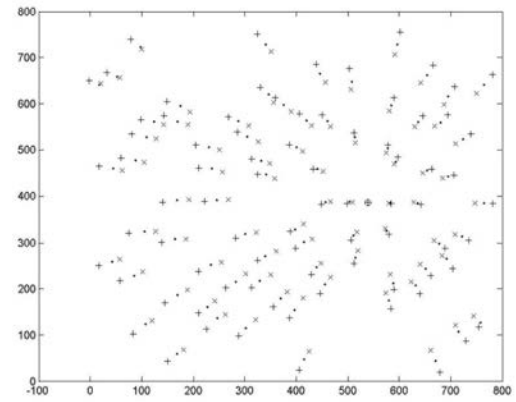
【 図 6 】



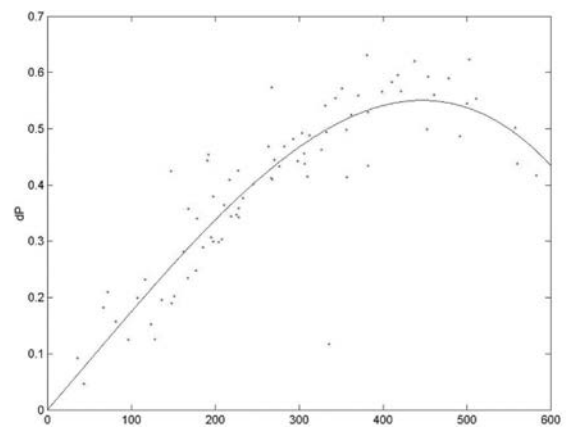
【図 1 4】



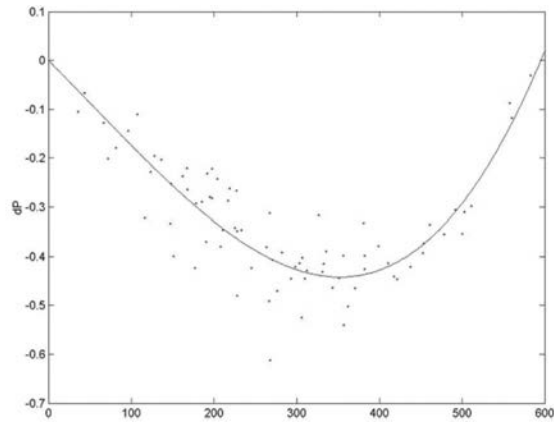
【図 1 5】



【図 1 6】



【図 1 7】



【図 1 8】

R1	G2	R3	G4	R5
G6	B7	G8	B9	G10
R11	G12	R13	G14	R15
G16	B17	G18	B19	G20
R21	G22	R23	G24	R25

【手続補正書】

【提出日】平成28年3月1日(2016.3.1)

【手続補正 1】

【補正対象書類名】明細書

【補正対象項目名】0010

【補正方法】変更

【補正の内容】

【0010】

第1の広汎な局面に従うと、ここで説明されているのは、校正と補正とを行う際に撮像装置をモデリングするために使用される、コンピュータによって実現される方法であって、前記方法は以下のものを備える：前記撮像装置の焦点に原点を有する第1の3D直交座標系(a first 3D orthogonal coordinate system)を定義すること、ただし、前記第1の座標系の第1軸は、前記撮像装置の視線の方向に沿って伸びている；前記焦点から単位距離(a unitary distance)だけ離れた原点を有する、第2の3D直交座標系を定義すること、ただし、前記第2の座標系の第1軸は、前記撮像装置の視線の方向に沿って伸びており、前記第2の座標系の第2軸および第3軸は、前記第1の座標系の第2軸および第3軸にそれぞれ実質的に平行であり、それによって前記第2の座標系の前記第2軸および前記第3軸は、前記視線に対して直角な実スケール面を規定しており；前記焦点から焦点距離だけ離れた原点を有する、第3の3D直交座標系を定義すること、ただし、前記第3の座標系の第1軸は、前記撮像装置の視線の方向に沿って伸びており、前記第3の座標系の第2軸および第3軸は、前記第2の座標系の前記第2軸および前記第3軸の方向に対して相対的に第1と第2の角度だけ傾いており、それによって前記第3の座標系の前記第2軸および前記第3軸は、前記視線に対して相対的に非直角な画像面を規定しており；前記撮像装置によってキャプチャされた実世界の3Dオブジェクトの点に関連づけられた3D座標を受け取ること；前記実スケール面への前記点の投影を計算しそれによって第1の平面座標の組(a first set of planar coordinates)を得るとともに、前記画像面への前記点の投影を計算しそれによって第2の平面座標の組を得ること；および前記3Dオブジェクトの前記点に対応する像点の位置を示す前記第2の平面座標の組を出力することである。

【手続補正 2】

【補正対象書類名】明細書

【補正対象項目名】0025

【補正方法】変更

【補正の内容】

【0025】

のように計算され、ここにおいて、微小角 θ および ϕ について、

$$\cos \theta \sim 1$$

および

$$\sin \theta \sim \theta$$

の近似が使用されている。

【手続補正 3】

【補正対象書類名】明細書

【補正対象項目名】0027

【補正方法】変更

【補正の内容】

【0027】

第2の広汎な局面に従うと、ここで説明されているのは、校正と画像補正との際に撮像装置をモデリングするために使用されるシステムであって、前記システムは、以下のものを備える：メモリ；プロセッサ；および前記メモリに格納され、前記プロセッサによって以下のことを実行可能な少なくともひとつのアプリケーション、前記撮像装置の焦点に原点を有する第1の3D直交座標系を定義すること、ただし、前記第1の座標系の第1軸は

、前記撮像装置の視線の方向に沿って伸びている；前記焦点から単位距離だけ離れた原点を有する、第2の3D直交座標系を定義すること、ただし、前記第2の座標系の第1軸は、前記撮像装置の視線の方向に沿って伸びており、前記第2の座標系の第2軸および第3軸は、前記第1の座標系の第2軸および第3軸にそれぞれ実質的に平行であり、それによって前記第2の座標系の前記第2軸および前記第3軸は、前記視線に対して直角な実スケール面を規定しており；前記焦点から焦点距離だけ離れた原点を有する、第3の3D直交座標系を定義すること、ただし、前記第3の座標系の第1軸は、前記撮像装置の視線の方向に沿って伸びており、前記第3の座標系の第2軸および第3軸は、前記第2の座標系の前記第2軸および前記第3軸の方向に対して相対的に第1と第2の角度だけ傾いており、それによって前記第3の座標系の前記第2軸および前記第3軸は、前記視線に対して相対的に非直角な画像面を規定しており；前記撮像装置によってキャプチャされた実世界の3Dオブジェクトの点に関連づけられた3D座標を受け取ること；前記実スケール面への前記点の投影を計算しそれによって第1の平面座標の組を得るとともに、前記画像面への前記点の投影を計算しそれによって第2の平面座標の組を得ること；および前記3Dオブジェクトの前記点に対応する像点の位置を示す前記第2の平面座標の組を出力することである。

【手続補正4】

【補正対象書類名】明細書

【補正対象項目名】0045

【補正方法】変更

【補正の内容】

【0045】

第3の広汎な局面に従うと、ここで説明されているのは、プロセッサによって実行されることによって、校正と画像補正との際に撮像装置をモデリングすることを可能なプログラムコードが格納されたコンピュータ読み取り可能な媒体であって、前記プログラムコードは、以下のことを可能とする：前記撮像装置の焦点に原点を有する第1の3D直交座標系を定義すること、ただし、前記第1の座標系の第1軸は、前記撮像装置の視線の方向に沿って伸びている；前記焦点から単位距離だけ離れた原点を有する、第2の3D直交座標系を定義すること、ただし、前記第2の座標系の第1軸は、前記撮像装置の視線の方向に沿って伸びており、前記第2の座標系の第2軸および第3軸は、前記第1の座標系の第2軸および第3軸にそれぞれ実質的に平行であり、それによって前記第2の座標系の前記第2軸および前記第3軸は、前記視線に対して直角な実スケール面を規定しており；前記焦点から焦点距離だけ離れた原点を有する、第3の3D直交座標系を定義すること、ただし、前記第3の座標系の第1軸は、前記撮像装置の視線の方向に沿って伸びており、前記第3の座標系の第2軸および第3軸は、前記第2の座標系の前記第2軸および前記第3軸の方向に対して相対的に第1と第2の角度だけ傾いており、それによって前記第3の座標系の前記第2軸および前記第3軸は、前記視線に対して相対的に非直角な画像面を規定しており；前記撮像装置によってキャプチャされた実世界の3Dオブジェクトの点に関連づけられた3D座標を受け取ること；前記実スケール面への前記点の投影を計算しそれによって第1の平面座標の組を得るとともに、前記画像面への前記点の投影を計算しそれによって第2の平面座標の組を得ること；および前記3Dオブジェクトの前記点に対応する像点の位置を示す前記第2の平面座標の組を出力することである。

【手続補正5】

【補正対象書類名】明細書

【補正対象項目名】0113

【補正方法】変更

【補正の内容】

【0113】

上述のように、 f は、カメラの内部モデルから得られる。カメラの内部モデルの近似値を生成するために、小さい角度 θ と、近似値

$$\cos \theta \sim 1$$

および

$$\sin \theta \sim \theta$$

を用いることができる。サインとコサインの他の近似が可能であることを理解すべきである。方程式(12)から下記にわかるように、代入すると、 h_{33} は、1になり、 $h_{13}=f$ と $h_{23}=-f$ とは像中心の修正を生じ、 h_{11} と h_{22} とは、 f となって、 x 、 y における共通のスケールを与え、 $h_{12}=f$ は、像の傾きの等価物を生成する。以前に示されているように、 $h_{31}=-$ と $h_{32}=-$ とは、0になり得ない。それらは、像中心に対して測定された x と y に対する $w'=1+y-x$ による再変倍の際に、像中心から x 、 y に沿って離れる透視の修正を、像に与える。

【手続補正6】

【補正対象書類名】明細書

【補正対象項目名】0114

【補正方法】変更

【補正の内容】

【0114】

【数23】

$$H = \begin{bmatrix} f \cos \beta & f \sin \beta \sin \alpha & f \sin \beta \cos \alpha \\ 0 & f \cos \alpha & -f \sin \alpha \\ -\sin \beta & \cos \beta \sin \alpha & \cos \beta \cos \alpha \end{bmatrix} \sim \begin{bmatrix} f & f\alpha\beta & f\beta \\ 0 & f & -f\alpha \\ -\beta & \alpha & 1 \end{bmatrix} \quad (17)$$

【手続補正7】

【補正対象書類名】明細書

【補正対象項目名】0136

【補正方法】変更

【補正の内容】

【0136】

提案する技術は、低解像度のカメラでの使用を意図しているので、図11に示されるような、 $f=4\text{ mm}$ のテスト用レンズを備えた 640×480 画素のベイヤ・パターン・ポイント・グレイ・リサーチ・ファイアフライ(商標)・カラーカメラ(Bayer Pattern Point Grey Research Firefly™ colour camera)が、例えば、選択される。

【 国際調査報告 】

INTERNATIONAL SEARCH REPORT		International application No. PCT/CA2014/000534		
A. CLASSIFICATION OF SUBJECT MATTER IPC: H04N 17/00 (2006.01)				
According to International Patent Classification (IPC) or to both national classification and IPC				
B. FIELDS SEARCHED				
Minimum documentation searched (classification system followed by classification symbols) IPC: H04N 17/00 (2006.01)				
Documentation searched other than minimum documentation to the extent that such documents are included in the fields searched				
Electronic database(s) consulted during the international search (name of database(s) and, where practicable, search terms used)				
Key Words : camera calibration, camera correction, 3d orthogonal coordinates, foical point, focal distance, camera parameters, planar coordinate, world coordinate, image correction, geometric distortion, 3d perspective projection, compensation, measuring distortion, lens distortion, line of sight.				
Databases : USPTO WEST, QUESTEL, IEEE_Xplore and Google Patent				
C. DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT				
Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages			Relevant to claim No.
A	WO 2013/015699 A1 (Joao et al.) 31 January 2013 (31.01.2013) Entire document			1-16
A	US 2012/0268579 A1 (Tao et al.) 25 October 2012 (25.10.2012) Entire document			1-16
A	US 2008/0031514 A1 (Toshiaki) 07 February 2008 (07.02.2008) Entire document			1-16
A	US 2010/0283856 A1 (Kahler et al.) 11 November 2010 (11.11.2010) Entire document			1-16
A	A New Solution for Camera Calibration and Real-Time Image Distortion Correction in Medical Endoscopy-Initial Technical Evaluation, Melo et al., 1 March 2012 (01.03.2012), IEEE TRANSACTIONS ON BIOMEDICAL ENGINEERING, VOL. 59, NO. 3 Entire document			1-16
A	AN APPROACH TO CORRECTING IMAGE DISTORTION BY SELF CALIBRATION STEREOSCOPIC SCENE FROM MULTIPLE VIEWS, Abouandinou et al., 25 November 2012, (25.11.2012), 2012 Eighth International Conference on Signal Image Technology and Internet Based Systems, Page(s) 389-394			1-16
<input type="checkbox"/> Further documents are listed in the continuation of Box C.		<input checked="" type="checkbox"/> See patent family annex.		
* Special categories of cited documents: "A" document defining the general state of the art which is not considered to be of particular relevance "E" earlier application or patent but published on or after the international filing date "L" document which may throw doubts on priority claim(s) or which is cited to establish the publication date of another citation or other special reason (as specified) "O" document referring to an oral disclosure, use, exhibition or other means "P" document published prior to the international filing date but later than the priority date claimed	"T" later document published after the international filing date or priority date and not in conflict with the application but cited to understand the principle or theory underlying the invention "X" document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered novel or cannot be considered to involve an inventive step when the document is taken alone "Y" document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered to involve an inventive step when the document is combined with one or more other such documents, such combination being obvious to a person skilled in the art "&" document member of the same patent family			
Date of the actual completion of the international search 19 September 2014 (19-09-2014)		Date of mailing of the international search report 29 September 2014 (29-09-2014)		
Name and mailing address of the ISA/CA Canadian Intellectual Property Office Place du Portage I, C114 - 1st Floor, Box PCT 50 Victoria Street Gatineau, Quebec K1A 0C9 Facsimile No.: 001-819-953-2476		Authorized officer Adel El Hamad (819) 934-2194		

INTERNATIONAL SEARCH REPORT
Information on patent family members

International application No.

PCT/CA2014/000534

Patent Document Cited in Search Report	Publication Date	Patent Family Member(s)	Publication Date
WO2013/015699A1	31 January 2013 (31-01-2013)	WO2013015699A1 CN103827917A EP2742484A1	31 January 2013 (31-01-2013) 28 May 2014 (28-05-2014) 18 June 2014 (18-06-2014)
US2012/0268579A1	25 October 2012 (25-10-2012)	US2012268579A1 US2010245541A1 US8223193B2	25 October 2012 (25-10-2012) 30 September 2010 (30-09-2010) 17 July 2012 (17-07-2012)
US2008/0031514A1	07 February 2008 (07-02-2008)	US2008031514A1 US8269848B2 CN101065969A EP1816869A1 EP1816869A4 JP2006148745A JP4681856B2 KR20070064371A KR100869570B1 WO2006057147A1	07 February 2008 (07-02-2008) 18 September 2012 (18-09-2012) 31 October 2007 (31-10-2007) 08 August 2007 (08-08-2007) 05 May 2010 (05-05-2010) 08 June 2006 (08-06-2006) 11 May 2011 (11-05-2011) 20 June 2007 (20-06-2007) 21 November 2008 (21-11-2008) 01 June 2006 (01-06-2006)
US2010/0283856A1	11 November 2010 (11-11-2010)	US2010283856A1 EP2249580A1	11 November 2010 (11-11-2010) 10 November 2010 (10-11-2010)

フロントページの続き

(51)Int.Cl. F I テーマコード(参考)
G 0 1 S 17/89 (2006.01) G 0 1 S 17/89

(81)指定国 AP(BW, GH, GM, KE, LR, LS, MW, MZ, NA, RW, SD, SL, SZ, TZ, UG, ZM, ZW), EA(AM, AZ, BY, KG, KZ, RU, TJ, TM), EP(AL, AT, BE, BG, CH, CY, CZ, DE, DK, EE, ES, FI, FR, GB, GR, HR, HU, IE, IS, IT, LT, LU, LV, MC, MK, MT, NL, NO, PL, PT, RO, RS, SE, SI, SK, SM, TR), OA(BF, BJ, CF, CG, CI, CM, GA, GN, GQ, GW, KM, ML, MR, NE, SN, TD, TG), AE, AG, AL, AM, AO, AT, AU, AZ, BA, BB, BG, BH, BN, BR, BW, BY, BZ, CA, CH, CL, CN, CO, CR, CU, CZ, DE, DK, DM, DO, DZ, EC, EE, EG, ES, FI, GB, GD, GE, GH, GM, GT, HN, HR, HU, ID, IL, IN, IR, IS, JP, KE, KG, KN, KP, KR, KZ, LA, LC, LK, LR, LS, LT, LU, LY, MA, MD, ME, MG, MK, MN, MW, MX, MY, MZ, NA, NG, NI, NO, NZ, OM, PA, PE, PG, PH, PL, PT, QA, RO, RS, RU, RW, SA, SC, SD, SE, SG, SK, SL, SM, ST, SV, SY, TH, TJ, TM, TN, TR, TT, TZ, UA, UG, US

Fターム(参考) 4C161 BB06 NN01 PP11
 5C061 BB11 CC01 EE17
 5C122 DA13 DA26 DA30 EA31 FA06 FB03 FE02 FH04 FH06 GA01
 HA13 HA35 HA88 HB01 HB05 HB06 HB10
 5J084 AA05 AD05 BA34 BB03 CA31 CA65 CA67 CA70 DA09 EA08
 EA11 EA19

专利名称(译)	<无法获取翻译>		
公开(公告)号	JP2016531281A5	公开(公告)日	2017-07-06
申请号	JP2016522146	申请日	2014-07-02
[标]申请(专利权)人(译)	盖伊马丁马丁		
申请(专利权)人(译)	盖伊马丁		
[标]发明人	ガイマーティン		
发明人	ガイ マーティン		
IPC分类号	G01S7/497 H04N5/225 G01C3/00 H04N17/00 A61B1/04 G01S17/89		
FI分类号	G01S7/497 H04N5/225.F G01C3/00.120 H04N17/00.200 A61B1/04.370 G01S17/89		
F-TERM分类号	2F112/AC06 2F112/AD01 2F112/BA06 2F112/CA12 2F112/DA05 2F112/DA32 2F112/FA03 2F112/FA21 2F112/FA23 2F112/FA45 4C161/BB06 4C161/NN01 4C161/PP11 5C061/BB11 5C061/CC01 5C061/EE17 5C122/DA13 5C122/DA26 5C122/DA30 5C122/EA31 5C122/FA06 5C122/FB03 5C122/FE02 5C122/FH04 5C122/FH06 5C122/GA01 5C122/HA13 5C122/HA35 5C122/HA88 5C122/HB01 5C122/HB05 5C122/HB06 5C122/HB10 5J084/AA05 5J084/AD05 5J084/BA34 5J084/BB03 5J084/CA31 5J084/CA65 5J084/CA67 5J084/CA70 5J084/DA09 5J084/EA08 5J084/EA11 5J084/EA19		
优先权	2819956 2013-07-02 CA		
其他公开文献	JP2016531281A		

摘要(译)

一 本发明涉及一种用于摄像机建模和校准的系统和方法，其使用一组新的变量来补偿视线轴到摄像机平面的正交性的缺陷。并提高测量由几何和彩色镜头像差引起的图像曲率引起的失真的精度，其中相机图像平面来自全3D透视投影表达了。[选择图]图8a