



(12) 发明专利

(10) 授权公告号 CN 110428472 B

(45) 授权公告日 2021. 11. 09

(21) 申请号 201910655582.X

G06F 17/12 (2006.01)

(22) 申请日 2019.07.19

G06F 17/16 (2006.01)

(65) 同一申请的已公布的文献号  
申请公布号 CN 110428472 A

(56) 对比文件  
CN 105469389 A, 2016.04.06  
CN 102999894 B, 2015.05.06

(43) 申请公布日 2019.11.08

审查员 夏冰

(73) 专利权人 中北大学  
地址 030000 山西省太原市学院路3号

(72) 发明人 储成群 单彦虎 张晓闻 焦新泉  
陈建军 李圣昆 赵冬青 甄国涌  
任勇峰 文丰

(74) 专利代理机构 苏州市中南伟业知识产权代  
理事务所(普通合伙) 32257  
代理人 李艾

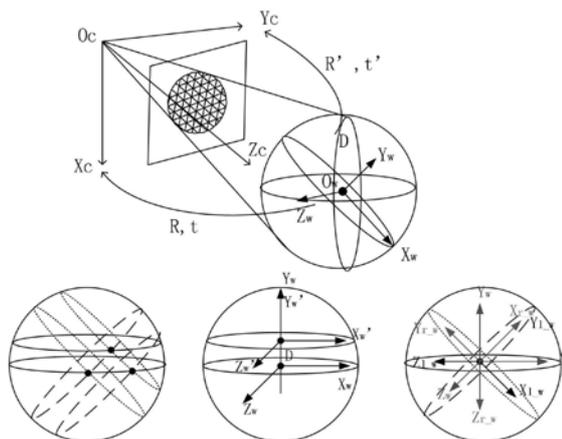
(51) Int. Cl.  
G06T 7/80 (2017.01)

权利要求书3页 说明书6页 附图5页

(54) 发明名称  
工业相机标定方法

(57) 摘要

本发明公开了一种三角形基元立体球靶标及工业相机标定方法。本发明一种三角形基元立体球靶标,包括:所述立体球靶标刻有高精度三角形网格线,网格线包括多个已知距离的水平横向圆,向左偏45°圆和向右偏45°圆。本发明的有益效果:本发明提出的三角形基元立体球靶标是带有高精度三角形网格线的立体球靶标,表面的曲线交点构成三角形基元,曲线交点可求,精度较高。根据相机标定知识,不同位置,不同角度的相机都可拍摄到清晰的三角形基元及其交点。



1. 一种单目工业相机标定方法,其特征在于,包括:

Step 1:提取三角形基元立体球靶标的椭圆曲线图像;其中,所述立体球靶标刻有高精度三角形网格线,网格线包括多个已知距离的水平横向圆,向左偏45°圆和向右偏45°圆;随机选择一点O,并检测该点邻域的六个点A、B、C、D、E、F,依次连接,得到六条线段,以A点为例,OA线段为初始的六条线段之一,先计算其它五条线段与OA的延长线所成的夹角,共分三类:[35° 55°],[125° 145°],[170° 190°],线段的两个端点O、A与另一条线段的端点A、H进行比较,两个邻近的点之间的距离小于4像素,同时两条线段延长线所成夹角角度在[170° 190°]之间,这两个线段被分成同一类曲线;曲线集共分成三组,依次搜索图像上的所有点,直到所有的线段都被划分成不同的曲线集,通过椭圆拟合,得到所有曲线集对应的椭圆曲线方程;

Step 2:根据3D射影几何及虚圆点的相似性变换定理,无穷远直线 $L_\infty$ 上有一对互为共轭复数的理想点在相似变换下是固定不动的,这两个点的归一化坐标设为 $I = (1, i, 0)^T$ ,  $J = (1, -i, 0)^T$ ,是一个圆与 $L_\infty$ 的两个交点,称为虚圆点;平行或者同一平面中的圆与绝对二次曲线的图像 $\omega$ 相交于同两个虚圆点;

根据摄像机标定知识,绝对二次曲线的图像 $\omega$ 与内参矩阵的关系如下:

$$\omega = (KK^T)^{-1} = K^{-T}K^{-1}$$

标定物上所有同向的圆在空间中都是平行的,所以在任何一个方向上图像的椭圆曲线e的投影曲线与 $\omega$ 之间的交点都交于两个相同的虚圆点,即 $m_i$ 和 $m_j$ ,其中, $m_i$ 和 $m_j$ 是共轭虚数,连接 $m_i$ 和 $m_j$ 之间的 $l_h$ 称为图像中一个水平方向的圆所在平面的消影线;

令 $v_1$ 是图像中水平方向直线的消影点, $v_2$ 、 $v_3$ 是图像中的右偏45°方向和左偏45°方向直线的消影点, $\omega$ 为图像中绝对二次曲线的像,如果 $\alpha = 45^\circ$ 、 $\beta = 45^\circ$ 、 $\gamma = 90^\circ$ 为 $v_1$ 和 $v_2$ , $v_2$ 和 $v_3$ , $v_1$ 和 $v_3$ 方向间的夹角,则

$$\cos \alpha = \frac{v_1^T \omega v_2}{\sqrt{v_1^T \omega v_1} \sqrt{v_2^T \omega v_2}}$$

$$\cos \beta = \frac{v_2^T \omega v_3}{\sqrt{v_2^T \omega v_2} \sqrt{v_3^T \omega v_3}}$$

$$\cos \gamma = \frac{v_3^T \omega v_1}{\sqrt{v_3^T \omega v_3} \sqrt{v_1^T \omega v_1}}$$

给出了两两直线之间的每个已知的角度关于 $\omega$ 的二次约束,由于每个方向的平行圆都交于同一对虚圆点,三个方向的虚圆点即为6个;因此,需要分别获得三个方向的图像平面与消失线相交,求出交于一点的三个方向的椭圆曲线,就可以求出6个虚圆点;对六个虚圆点进行拟合,根据此即可求得 $\omega$ ,由Cholesky分解求得摄像机内参数;

根据消影点相关知识,无穷远点作为标定物上的一部分与相机无关,消影点是无穷远点的图像,故消影点不受相机位置变化的影响,但要受到相机旋转的影响;设相机的旋转矩阵 $R = [r_1 \ r_2 \ r_3]$ , $v_1, v_2, v_3$ 分别是坐标系 $O_{h(i)} x_{h(i)} y_{h(i)} z_{h(i)}$ ,  $O_{r_h(j)} x_{r_h(j)} y_{r_h(j)} z_{r_h(j)}$ 和 $O_{1_h(k)}$

$x_{1\_h(k)} y_{1\_h(k)} z_{1\_h(k)}$  下的消影点,  $d_1, d_2, d_3$  分别是对应消影点在相应坐标系中单位矢量, 其中  $d_1 = [1 \ 0 \ 0]^T, d_2 = [0 \ 1 \ 0]^T, d_3 = [0 \ 0 \ 1]^T$ ;  $v_i$  与  $d_i$  有如下关系:

$$v_1 = \mu_1 K R d_1$$

$$v_2 = \mu_2 K R d_2$$

$$v_3 = \mu_3 K R d_3$$

求得

$$r_1 = \pm \frac{K^{-1} v_1}{\|K^{-1} v_1\|}$$

$$r_2 = \pm \frac{K^{-1} v_2}{\|K^{-1} v_2\|}$$

$$r_3 = \pm \frac{K^{-1} v_3}{\|K^{-1} v_3\|}$$

$\|K^{-1} v_1\|, \|K^{-1} v_2\|, \|K^{-1} v_3\|$  为归一化因子; 由于  $r_1, r_2, r_3$  是单位正交向量, 因此根据关系  $r_1 = r_2 \times r_3$ , 即可求得旋转矩阵;

根据数理几何知识, 设在坐标系  $0_{h(i)} x_{h(i)} y_{h(i)} z_{h(i)}$  下第  $i$  个水平圆的标准方程为  $x^2 + y^2 = d_i^2$ , 写成矩阵表达式的形式为  $C_{h(i)} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & -d_i^2 \end{bmatrix}$ , 其中  $d_i$  是第  $i$  个水平圆的半

径, 对于第  $i$  个水平圆  $C_{h(i)}$  的坐标系  $0_{h(i)} x_{h(i)} y_{h(i)} z_{h(i)}$  是与  $0_w x_w y_w z_w$  平行的, 对于另外两个方向的圆,  $0_{r_h(j)} x_{r_h(j)} y_{r_h(j)} z_{r_h(j)}$  和  $0_{l_h(k)} x_{l_h(k)} y_{l_h(k)} z_{l_h(k)}$  的坐标系分别与  $0_w x_w y_w z_w$  的坐标系呈  $45^\circ$  与  $135^\circ$  夹角, 三个坐标系的坐标原点为球心坐标; 但是在  $Z$  轴的方向上每两个相邻圆的距离同为  $D$ ,  $D$  是已知量, 即为标定物上的固定尺寸; 因此, 平移向量由  $t' = t + R \times [0 \ 0 \ D]^T$  计算,  $D$  的符号有正负之分,  $Z$  轴的正方向为正, 负方向为负;

Step 3: 椭圆拟合后, 得到三类不同方向的椭圆曲线方程, 对每三个椭圆曲线进行线性方程组求解, 得到的线性解即为交点坐标; 对三角形网格球拍摄不同的图像, 利用对椭圆曲线的方程组计算, 得到交点坐标; 如若出现无解的情况, 则用最速下降法进行迭代寻优, 找到最优解; 最后对内外参数初始解及交点坐标进行非线性优化, 得到最优解。

2. 如权利要求1所述的单目工业相机标定方法, 其特征在于, 所述立体球靶标采用机械加工或者3D打印制作。

3. 如权利要求1所述的单目工业相机标定方法, 其特征在于, 所述立体球靶标的材料包括以下塑料、泡沫、金属、陶瓷或玻璃的一种或多种。

4. 如权利要求1所述的单目工业相机标定方法, 其特征在于, 所述立体球靶标表面覆盖的曲线用机械加工方式中的激光刻在球体上或者用印刷的方式印在球体上。

5. 一种双目工业相机标定方法, 其特征在于, 利用所搭建的双目视觉传感系统拍摄视场中三角形基元立体球靶标, 获得标定时所用的图像信息;

利用权利要求1的单目工业相机标定方法相同的方法分别计算双目视觉传感系统中的两个相机的内外参数; 为了提高标定结果精度, 进行多次数据采集, 通过非线性优化求得最优解。

6. 一种多目工业相机标定方法,其特征在于,将立体靶标固定,在其周围放置多个相机,同时拍摄共同视场中的三角形基元立体球靶标;利用与权利要求1的单目工业相机标定方法相同的方法完成对多个相机内外参数的标定;最后利用非线性优化求得内外参数的最优解。

7. 一种计算机设备,包括存储器、处理器及存储在存储器上并可在处理器上运行的计算机程序,其特征在于,所述处理器执行所述程序时实现权利要求1到6任一项所述方法的步骤。

8. 一种计算机可读存储介质,其上存储有计算机程序,其特征在于,该程序被处理器执行时实现权利要求1到6任一项所述方法的步骤。

9. 一种处理器,其特征在于,所述处理器用于运行程序,其中,所述程序运行时执行权利要求1到6任一项所述的方法。

## 工业相机标定方法

### 技术领域

[0001] 本发明涉及工业相机标定领域,具体涉及一种三角形基元立体球靶标及工业相机标定方法。

### 背景技术

[0002] 相机标定是从物体的二维平面图像中获取三维信息的关键步骤,工业相机标定是射影测量和机器视觉的经典问题。相机标定方法根据标定方式的不同可分为传统相机标定方法,基于主动视觉标定方法和自标定方法。传统相机标定方法中根据标定物的不同又可分为基于0D靶标、1D靶标、2D靶标以及3D靶标的标定。基于0D靶标的相机标定属于相机自标定范畴,不需要任何标定物。基于1D靶标的相机标定方法在一定情况下只能标定一台相机,限制了1D目标在基于机器视觉测量系统中的应用。基于2D靶标的相机标定方法,应用最广泛的是棋盘格作为靶标的标定方法,目标制作简单,移动灵活,标定精度高。但使用2D靶标进行相机标定时,必须采集两幅或者两幅以上的图像。

[0003] 此外,一些研究人员还利用2D目标中的不同特征来得到不同的标定方法。相比而言,基于3D靶标的相机标定,可采集一幅图像进行标定,标定精度高,但制作高精度的三维标定物难度较高,不易实现。对于不同视点下多相机的标定可使用球靶标进行,但使用单纯的球进行标定精度很难满足测量需求。

### 发明内容

[0004] 本发明要解决的技术问题是提供一种三角形基元立体球靶标及工业相机标定方法,该标定物以球作为基底,在球的表面覆盖三角形网格。利用该标定物对工业相机进行标定既可以解决二维平面标定物不能同时对不同位置的相机进行同步标定的问题,又可以解决三维球标定精度不高的问题。

[0005] 为了解决上述技术问题,本发明提供了一种三角形基元立体球靶标,包括:所述立体球靶标刻有高精度三角形网格线,网格线包括多个已知距离的水平横向圆,向左偏 $45^\circ$ 圆和向右偏 $45^\circ$ 圆。

[0006] 在其中一个实施例中,所述立体球靶标采用机械加工或者3D打印制作。

[0007] 在其中一个实施例中,所述立体球靶标的材料包括以下塑料、泡沫、金属、陶瓷或玻璃的一种或多种。

[0008] 在其中一个实施例中,所述立体球靶标表面覆盖的曲线用机械加工方式中的激光刻在球体上或者用印刷的方式印在球体上。

[0009] 一种单目工业相机标定方法,包括:

[0010] Step 1:提取任一项所述的三角形基元立体球靶标的椭圆曲线图像;随机选择一点O,并检测该点邻域的六个点A、B、C、D、E、F,依次连接,得到六条线段,以A点为例,OA线段为初始的六条线段之一,先计算其它五条线段与OA的延长线所成的夹角,共分三类:[ $35^\circ 55^\circ$ ],[ $125^\circ 145^\circ$ ],[ $170^\circ 190^\circ$ ],线段的两个端点O、A与另一条线段的端点A、H进行比较,两

个邻近的点之间的距离小于4像素,同时两条线段延长线所成夹角角度在 $[170^\circ 190^\circ]$ 之间,这两个线段被分成同一类曲线。曲线集共分成三组,依次搜索图像上的所有点,直到所有的线段都被划分成不同的曲线集,通过椭圆拟合,得到所有曲线集对应的椭圆曲线方程。

[0011] Step2:根据3D射影几何及虚圆点的相似性变换定理,无穷远直线 $L_\infty$ 上有一对互为共轭复数的理想点在相似变换下是固定不动的,这两个点的归一化坐标设为 $I = (1, i, 0)^T$ ,  $J = (1, -i, 0)^T$ ,是一个圆与 $L_\infty$ 的两个交点,称为虚圆点。平行或者同一平面中的圆与绝对二次曲线的图像 $\omega$ 相交于同两个虚圆点。

[0012] 根据摄像机标定知识,绝对二次曲线的图像 $\omega$ 与内参矩阵的关系如下:

$$[0013] \quad \omega = (KK^T)^{-1} = K^{-T}K^{-1}$$

[0014] 如图7(a)和图7(b)所示,标定物上所有同向的圆在空间中都是平行的,所以在任何一个方向上图像的椭圆曲线 $e$ 的投影曲线与 $\omega$ 之间的交点都交于两个相同的虚圆点,即 $m_i$ 和 $m_j$ 其中, $m_i$ 和 $m_j$ 是共轭虚数,连接 $m_i$ 和 $m_j$ 之间的 $l_h$ 称为图像中一个水平方向的圆所在平面的消影线。

[0015] 令 $v_1$ 是图像中水平方向直线的消影点, $v_2$ 、 $v_3$ 是图像中的右偏 $45^\circ$ 方向和左偏 $45^\circ$ 方向直线的消影点, $\omega$ 为图像中绝对二次曲线的像,如果 $\alpha = 45^\circ$ 、 $\beta = 45^\circ$ 、 $\gamma = 90^\circ$ 为 $v_1$ 和 $v_2$ , $v_2$ 和 $v_3$ , $v_1$ 和 $v_3$ 方向间的夹角,则

$$[0016] \quad \cos \alpha = \frac{v_1^T \omega v_2}{\sqrt{v_1^T \omega v_1} \sqrt{v_2^T \omega v_2}}$$

$$[0017] \quad \cos \beta = \frac{v_2^T \omega v_3}{\sqrt{v_2^T \omega v_2} \sqrt{v_3^T \omega v_3}}$$

$$[0018] \quad \cos \gamma = \frac{v_3^T \omega v_1}{\sqrt{v_3^T \omega v_3} \sqrt{v_1^T \omega v_1}}$$

[0019] 上述公式给出了两两直线之间的每个已知的角度关于 $\omega$ 的二次约束,由于每个方向的平行圆都交于同一对虚圆点,三个方向的虚圆点即为6个。因此,需要分别获得三个方向的图像平面与消失线相交,求出交于一点的三个方向的椭圆曲线,就可以求出6个虚圆点。对六个虚圆点进行拟合,根据此即可求得 $\omega$ ,由Cholesky分解求得摄像机内参数。

[0020] 根据消影点相关知识,无穷远点作为标定物上的一部分与相机无关,消影点是无穷远点的图像,故消影点不受相机位置变化的影响,但要受到相机旋转的影响。设相机的旋转矩阵 $R = [r_1 \ r_2 \ r_3]$ , $v_1, v_2, v_3$ 分别是坐标系 $O_{h(i)} x_{h(i)} y_{h(i)} z_{h(i)}$ ,  $O_{r,h(j)} x_{r,h(j)} y_{r,h(j)} z_{r,h(j)}$ 和 $O_{l,h(k)} x_{l,h(k)} y_{l,h(k)} z_{l,h(k)}$ 下的消影点, $d_1, d_2, d_3$ 分别是对应消影点在相应坐标系中单位矢量,其中 $d_1 = [1 \ 0 \ 0]^T$ ,  $d_2 = [0 \ 1 \ 0]^T$ ,  $d_3 = [0 \ 0 \ 1]^T$ 。 $v_i$ 与 $d_i$ 有如下关系:

$$[0021] \quad v_1 = \mu_1 K R d_1$$

$$[0022] \quad v_2 = \mu_2 K R d_2$$

$$[0023] \quad v_3 = \mu_3 K R d_3$$

[0024] 求得

$$[0025] \quad r_1 = \pm \frac{K^{-1}v_1}{\|K^{-1}v_1\|}$$

$$[0026] \quad r_2 = \pm \frac{K^{-1}v_2}{\|K^{-1}v_2\|}$$

$$[0027] \quad r_3 = \pm \frac{K^{-1}v_3}{\|K^{-1}v_3\|}$$

[0028]  $\|K^{-1}v_1\|, \|K^{-1}v_2\|, \|K^{-1}v_3\|$  为归一化因子。由于  $r_1, r_2, r_3$  是单位正交向量, 因此根据关系  $r_1 = r_2 \times r_3$ , 即可求得旋转矩阵。

[0029] 根据数理几何知识, 设在坐标系  $O_{h(i)} x_{h(i)} y_{h(i)} z_{h(i)}$  下第  $i$  个水平圆的标准方程为

$$x^2 + y^2 = d_i^2, \text{ 写成矩阵表达式的形式为 } C_{h(i)} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & -d_i^2 \end{bmatrix} \text{ 其中 } d_i \text{ 是第 } i \text{ 个水平圆的半}$$

径, 对于第  $i$  个水平圆  $C_{h(i)}$  的坐标系  $O_{h(i)} x_{h(i)} y_{h(i)} z_{h(i)}$  是与  $O_w x_w y_w z_w$  平行的, 对于另外两个方向的圆,  $O_{r_h(j)} x_{r_h(j)} y_{r_h(j)} z_{r_h(j)}$  和  $O_{l_h(k)} x_{l_h(k)} y_{l_h(k)} z_{l_h(k)}$  的坐标系分别与  $O_w x_w y_w z_w$  的坐标系呈  $45^\circ$  与  $135^\circ$  夹角, 三个坐标系的坐标原点为球心坐标。但是在  $Z$  轴的方向上每两个相邻圆的距离同为  $D$ ,  $D$  是已知量, 即为标定物上的固定尺寸。因此, 平移向量由  $t' = t + R \times [0 \ 0 \ D]^T$  计算,  $D$  的符号有正负之分,  $Z$  轴的正方向为正, 负方向为负。

[0030] Step 3: 椭圆拟合后, 得到三类不同方向的椭圆曲线方程, 对每三个椭圆曲线进行线性方程组求解, 得到的线性解即为交点坐标; 对三角形网格球拍摄不同的图像, 利用对椭圆曲线的方程组计算, 得到交点坐标。如若出现无解的情况, 则用最速下降法进行迭代寻优, 找到最优解。最后对内外参数初始解及交点坐标进行非线性优化, 得到最优解。

[0031] 一种双目工业相机标定方法, 利用所搭建的双目视觉传感系统拍摄视场中三角形基元立体球靶标, 获得标定时所用的图像信息;

[0032] 利用上述的单目工业相机标定方法相同的方法分别计算双目视觉传感系统中的两个相机的内外参数; 为了提高标定结果精度, 可进行多次数据采集, 通过非线性优化求得最优解。

[0033] 一种多目工业相机标定方法, 将立体靶标固定, 在其周围放置多个相机, 同时拍摄共同视场中的三角形基元立体球靶标; 利用上述的单目工业相机标定方法相同的方法完成对多个相机内外参数的标定; 最后利用非线性优化求得内外参数的最优解。

[0034] 一种计算机设备, 包括存储器、处理器及存储在存储器上并可在处理器上运行的计算机程序, 所述处理器执行所述程序时实现任一项所述方法的步骤。

[0035] 一种计算机可读存储介质, 其上存储有计算机程序, 该程序被处理器执行时实现任一项所述方法的步骤。

[0036] 一种处理器, 所述处理器用于运行程序, 其中, 所述程序运行时执行任一项所述的方法。

[0037] 本发明的有益效果:

[0038] 本发明提出的三角形基元立体球靶标是带有高精度三角形网格线的立体球靶标, 表面的曲线交点构成三角形基元, 曲线交点可求, 精度较高。根据相机标定知识, 不同位置,

不同角度的相机都可拍摄到清晰的三角形基元及其交点。而本发明公开的算法并不需要拍摄到所有的立体球及表面所有三角形基元,不论拍摄角度如何,位置如何,只要在视场中拍摄部分标定物,清晰的看到部分线条及交点即可。因此,本发明与现有技术相比的优点在于:本发明以三角形作为基元比四边形具有更优的约束关系,利用该靶标进行工业相机标定,可对不同视点下的多个相机进行同步标定,同时也解决了三维球靶标标定精度不高的问题。

### 附图说明

[0039] 图1(a)、图1(b)分别为本发明以三角形为基元的立体球靶标正视图和俯视图的模型示意图。

[0040] 图2(a)、图2(b)分别为本发明以三角形为基元的立体球靶标正视图实物示意图。

[0041] 图3为本发明所提供三角形基元立体球靶标相机模型建立示意图。

[0042] 图4为本发明所提供的曲线拟合示意图。

[0043] 图5为空间球透视投影模型示意图。

[0044] 图6(a)、图6(b)为交点与角点的差距对比示意图。

[0045] 图7(a)、图7(b)为本发明所提供靶标与虚圆点的关系示意图。

[0046] 图8为本发明所提供平移向量关系示意图。

### 具体实施方式

[0047] 下面结合附图和具体实施例对本发明作进一步说明,以使本领域的技术人员可以更好地理解本发明并能予以实施,但所举实施例不作为对本发明的限定。

[0048] 三角形是欧几里德平面仅有的三个常见的倾斜面之一,除了棋盘格,唯一可以进行交替着色的形状,可提供比棋盘格更多的约束关系。

[0049] 本发明结合球与三角形的优点,设计立体三角形网格球靶标进行相机标定,可适用于机器人标定,机器视觉,测量系统等场合,故而,有很广阔的应用前景。

[0050] 如图1(a)和图1(b)所示分别为本发明中新的靶标正视图和俯视图下的模型示意图,如图2(a)和图2(b)所示分别为本发明中新的靶标正视图下的实物示意图,该靶标为刻有高精度三角形网格线的立体球靶标,网格线由多个已知距离的水平横向圆,向左偏 $45^\circ$ 圆和向右偏 $45^\circ$ 圆等三类圆组成。立体球可采用机械加工或者3D打印等方式制作,材料有多种选择,如塑料、泡沫、金属、陶瓷或玻璃等等。球体表面覆盖的曲线既可用机械加工方式中的激光刻在球体上,也可用印刷的方式印在球体上,只要线条颜色与球体颜色区分明显即可。三角形基元立体球靶标上各网格线位置已知,且精度较高。

[0051] 本发明分别介绍了采用新的三维立体靶标完成单目相机、双目相机和多目相机的标定方法。

[0052] 1. 单目相机标定

[0053] Step 1:参阅图3,提取三角形基元立体球靶标的椭圆曲线图像,如图4所示,随机选择一点O,并检测该点邻域的六个点A、B、C、D、E、F,依次连接,得到六条线段,以A点为例,OA线段为初始的六条线段之一,先计算其它五条线段与OA的延长线所成的夹角,共分三类: $[35^\circ 55^\circ]$ , $[125^\circ 145^\circ]$ , $[170^\circ 190^\circ]$ ,线段的两个端点O、A与另一条线段的端点A、H进行比

较,两个邻近的点之间的距离小于4像素,同时两条线段延长线所成夹角角度在 $[170^\circ 190^\circ]$ 之间,这两个线段被分成同一类曲线。曲线集共分成三组,依次搜索图像上的所有点,直到所有的线段都被划分成不同的曲线集,通过椭圆拟合,得到所有曲线集对应的椭圆曲线方程。

[0054] Step 2:参阅图5、图6(a)和图6(b),根据3D射影几何及虚圆点的相似性变换定理,无穷远直线 $L_\infty$ 上有一对互为共轭复数的理想点在相似变换下是固定不动的,这两个点的归一化坐标设为 $I=(1, i, 0)^T, J=(1, -i, 0)^T$ ,是一个圆与 $L_\infty$ 的两个交点,称为虚圆点。平行或者同一平面中的圆与绝对二次曲线的图像 $\omega$ 相交于同两个虚圆点。

[0055] 根据摄像机标定知识,绝对二次曲线的图像 $\omega$ 与内参矩阵的关系如下:

$$[0056] \quad \omega = (KK^T)^{-1} = K^{-T}K^{-1}$$

[0057] 如图7(a)和图7(b)所示,标定物上所有同向的圆在空间中都是平行的,所以在任何一个方向上图像的椭圆曲线 $e$ 的投影曲线与 $\omega$ 之间的交点都交于两个相同的虚圆点,即 $m_i$ 和 $m_j$ 其中, $m_i$ 和 $m_j$ 是共轭虚数,连接 $m_i$ 和 $m_j$ 之间的 $l_h$ 称为图像中一个水平方向的圆所在平面的消影线。

[0058] 令 $v_1$ 是图像中水平方向直线的消影点, $v_2, v_3$ 是图像中的右偏 $45^\circ$ 方向和左偏 $45^\circ$ 方向直线的消影点, $\omega$ 为图像中绝对二次曲线的像,如果 $\alpha=45^\circ, \beta=45^\circ, \gamma=90^\circ$ 为 $v_1$ 和 $v_2, v_2$ 和 $v_3, v_1$ 和 $v_3$ 方向间的夹角,则

$$[0059] \quad \cos \alpha = \frac{v_1^T \omega v_2}{\sqrt{v_1^T \omega v_1} \sqrt{v_2^T \omega v_2}}$$

$$[0060] \quad \cos \beta = \frac{v_2^T \omega v_3}{\sqrt{v_2^T \omega v_2} \sqrt{v_3^T \omega v_3}}$$

$$[0061] \quad \cos \gamma = \frac{v_3^T \omega v_1}{\sqrt{v_3^T \omega v_3} \sqrt{v_1^T \omega v_1}}$$

[0062] 上述公式给出了两两直线之间的每个已知的角度关于 $\omega$ 的二次约束,由于每个方向的平行圆都交于同一对虚圆点,三个方向的虚圆点即为6个。因此,需要分别获得三个方向的图像平面与消失线相交,求出交于一点的三个方向的椭圆曲线,就可以求出6个虚圆点。对六个虚圆点进行拟合,根据此即可求得 $\omega$ ,由Cholesky分解求得摄像机内参数。

[0063] 根据消影点相关知识,无穷远点作为标定物上的一部分与相机无关,消影点是无穷远点的图像,故消影点不受相机位置变化的影响,但要受到相机旋转的影响。设相机的旋转矩阵 $R=[r_1 \ r_2 \ r_3]$ , $v_1, v_2, v_3$ 分别是坐标系 $O_{h(i)} x_{h(i)} y_{h(i)} z_{h(i)}$ , $O_{r_h(j)} x_{r_h(j)} y_{r_h(j)} z_{r_h(j)}$ 和 $O_{1_h(k)} x_{1_h(k)} y_{1_h(k)} z_{1_h(k)}$ 下的消影点, $d_1, d_2, d_3$ 分别是对应消影点在相应坐标系中单位矢量,其中 $d_1=[1 \ 0 \ 0]^T, d_2=[0 \ 1 \ 0]^T, d_3=[0 \ 0 \ 1]^T$ 。 $v_i$ 与 $d_i$ 有如下关系:

$$[0064] \quad v_1 = \mu_1 K R d_1$$

$$[0065] \quad v_2 = \mu_2 K R d_2$$

$$[0066] \quad v_3 = \mu_3 K R d_3$$

[0067] 求得

$$[0068] \quad r_1 = \pm \frac{K^{-1}v_1}{\|K^{-1}v_1\|}$$

$$[0069] \quad r_2 = \pm \frac{K^{-1}v_2}{\|K^{-1}v_2\|}$$

$$[0070] \quad r_3 = \pm \frac{K^{-1}v_3}{\|K^{-1}v_3\|}$$

[0071]  $\|K^{-1}v_1\|, \|K^{-1}v_2\|, \|K^{-1}v_3\|$  为归一化因子。由于  $r_1, r_2, r_3$  是单位正交向量, 因此根据关系  $r_1 = r_2 \times r_3$ , 即可求得旋转矩阵。

[0072] 根据数理几何知识, 设在坐标系  $O_{h(i)}x_{h(i)}y_{h(i)}z_{h(i)}$  下第  $i$  个水平圆的标准方程为

$$x^2 + y^2 = d_i^2, \text{ 写成矩阵表达式的形式为 } C_{h(i)} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & -d_i^2 \end{bmatrix}, \text{ 其中 } d_i \text{ 是第 } i \text{ 个水平圆的半}$$

径, 对于第  $i$  个水平圆  $C_{h(i)}$  的坐标系  $O_{h(i)}x_{h(i)}y_{h(i)}z_{h(i)}$  是与  $O_w x_w y_w z_w$  平行的, 对于另外两个方向的圆,  $O_{r_h(j)}x_{r_h(j)}y_{r_h(j)}z_{r_h(j)}$  和  $O_{l_h(k)}x_{l_h(k)}y_{l_h(k)}z_{l_h(k)}$  的坐标系分别与  $O_w x_w y_w z_w$  的坐标系呈  $45^\circ$  与  $135^\circ$  夹角, 三个坐标系的坐标原点为球心坐标。参阅图8, 但是在  $Z$  轴的方向上每两个相邻圆的距离同为  $D$ ,  $D$  是已知量, 即为标定物上的固定尺寸。因此, 平移向量由  $t' = t + R \times [0 \ 0 \ D]^T$  计算,  $D$  的符号有正负之分,  $Z$  轴的正方向为正, 负方向为负。

[0073] Step 3: 椭圆拟合后, 得到三类不同方向的椭圆曲线方程, 对每三个椭圆曲线进行线性方程组求解, 得到的线性解即为交点坐标; 对三角形网格球拍摄不同的图像, 利用对椭圆曲线的方程组计算, 得到交点坐标。如若出现无解的情况, 则用最速下降法进行迭代寻优, 找到最优解。最后对内外参数初始解及交点坐标进行非线性优化, 得到最优解。

[0074] 2. 双目相机标定

[0075] Step 1: 本发明的相关算法还可应用于双目相机标定。利用所搭建的双目视觉传感系统拍摄视场中三角形基元立体球靶标, 获得标定时所用的图像信息。

[0076] Step 2: 在Step 1的基础上, 分别计算双目视觉传感系统中的两个相机的内外参数。为了提高标定结果精度, 可进行多次数据采集, 通过非线性优化求得最优解。

[0077] 3. 多目相机标定

[0078] 将立体靶标固定, 在其周围放置多个相机, 同时拍摄共同视场中的三角形基元立体球靶标。用本发明的方法完成对多个相机内外参数的标定。最后利用非线性优化求得内外参数的最优解。

[0079] 以上所述实施例仅是为充分说明本发明而所举的较佳的实施例, 本发明的保护范围不限于此。本技术领域的技术人员在本发明基础上所作的等同替代或变换, 均在本发明的保护范围之内。本发明的保护范围以权利要求书为准。

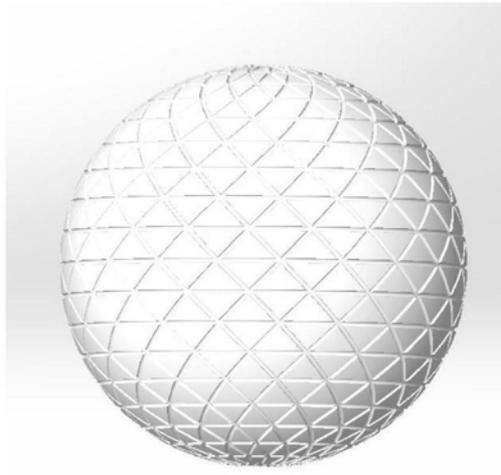


图1 (a)

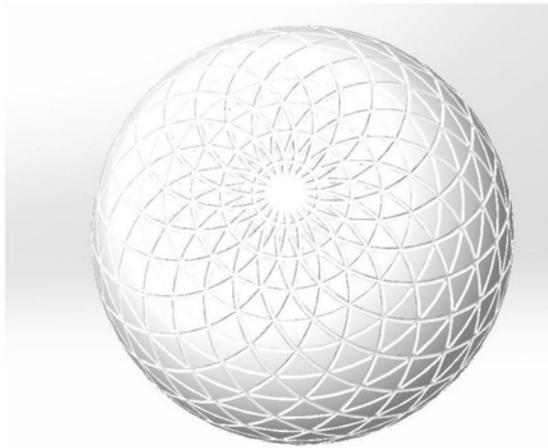


图1 (b)



图2 (a)



图2 (b)

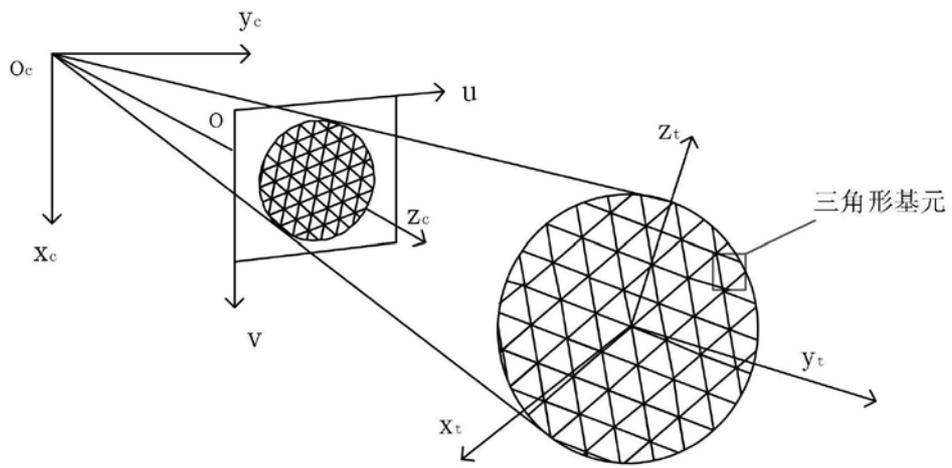


图3

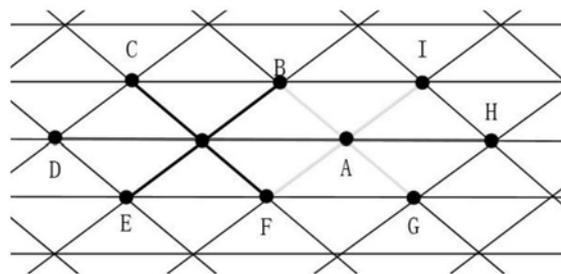


图4

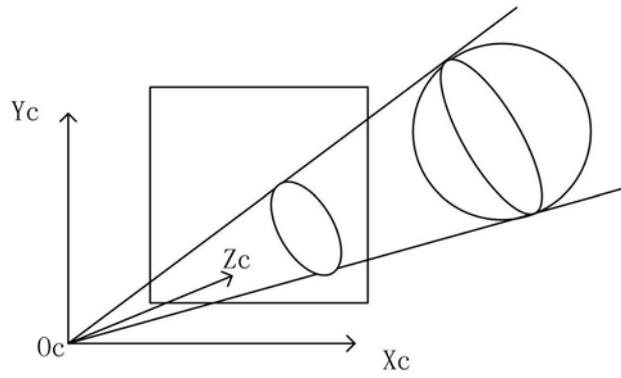


图5

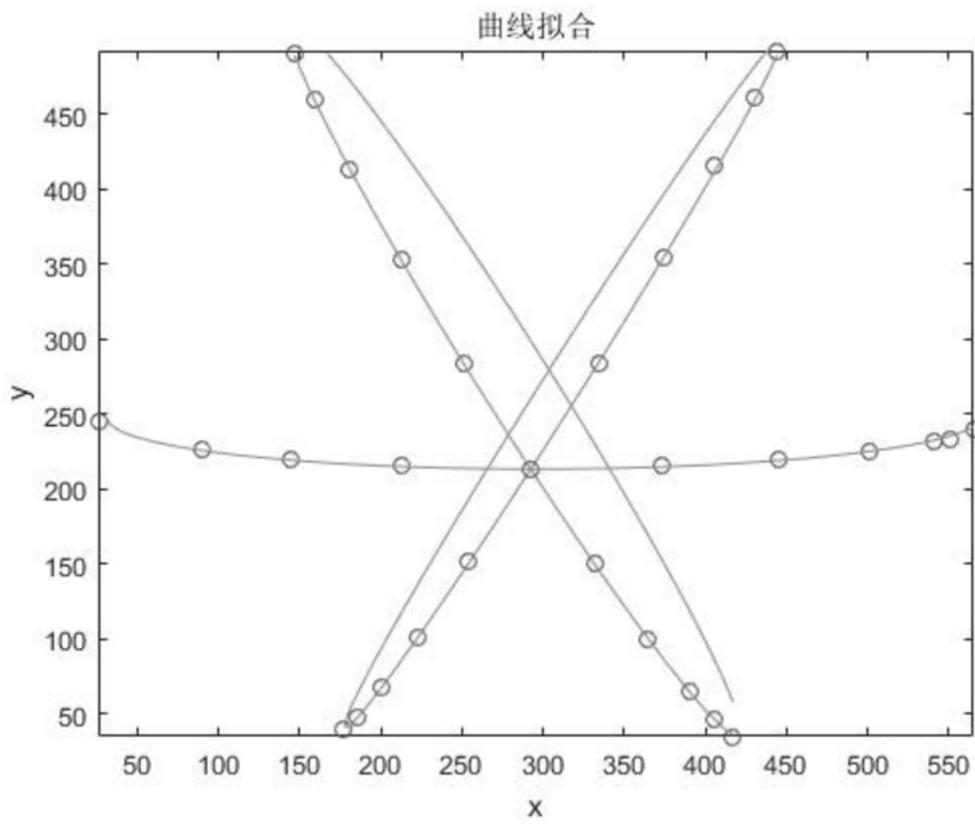


图6(a)

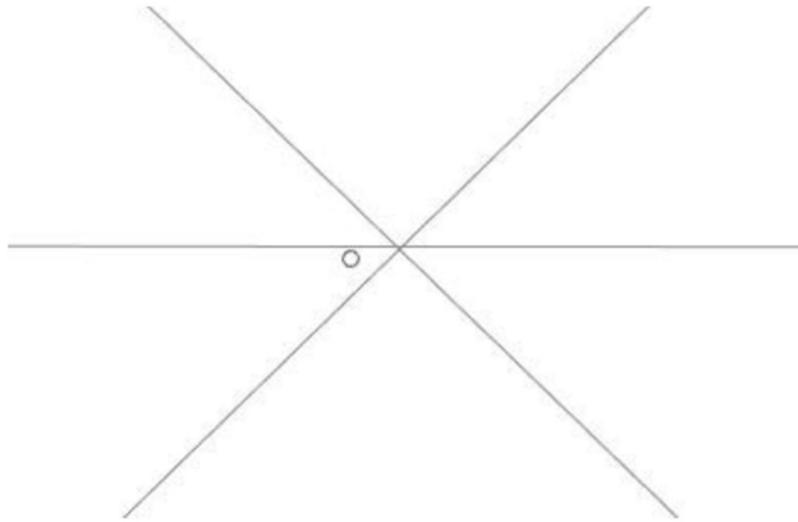


图6 (b)

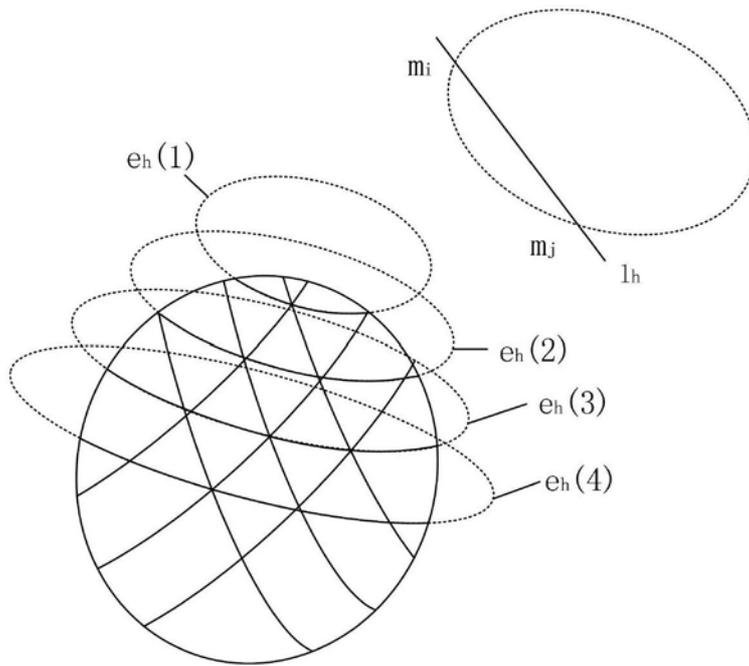


图7 (a)

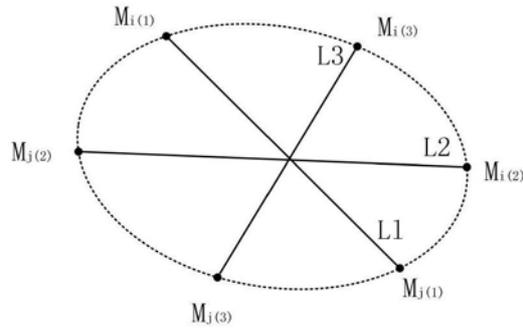


图7 (b)

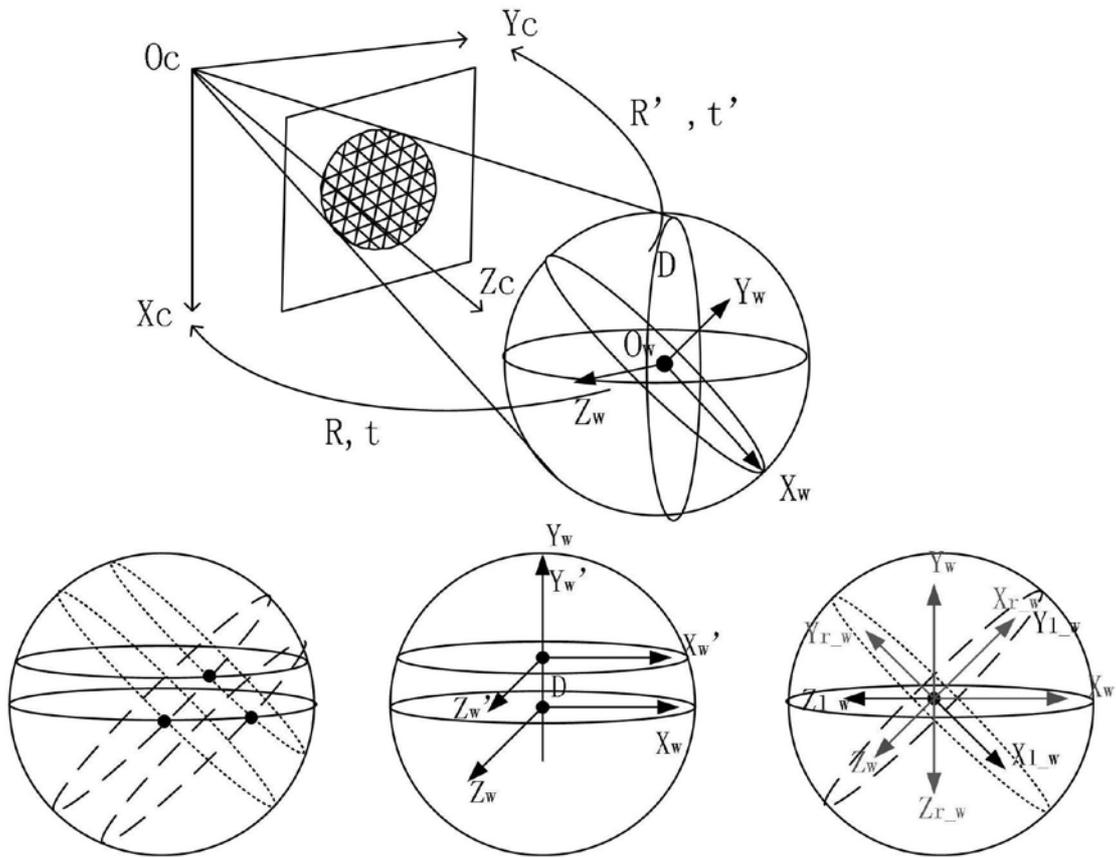


图8