

基于同心圆阵列的结构光主动视觉系统 标定算法

李燕, 严永财
(暨南大学, 广东广州 510632)

摘要: 投影仪向绘制有同心圆阵列的标定板投射彩色同心圆, 利用同心圆投影满足的几何约束确定圆心图像坐标, 计算标定平面、投影平面和相机成像平面之间的单应, 实现系统标定. 利用颜色信息分离投影同心圆和标定板标记图像, 简化标定步骤减少图像采集数量; 同时通过交比不变性实现同心圆自动匹配, 避免人工干预. 实验结果证明算法简单高效.

关键词: 标定; 主动视觉系统; 投影仪; 结构光; 同心圆; 三维重建

中图分类号: TP391 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2021)03-0536-06

电子学报 URL: <http://www.ejournal.org.cn> **DOI:** 10.12263/DZXB.20191033

A Novel Calibration Method for Active Vision System Based on Array of Concentric Circles

LI Yan, YAN Yong-cai
(Jinan University, Guangzhou, Guangdong 510632, China)

Abstract: A calibration method is proposed for active vision systems. Projector projects colored concentric circles to a calibration plane, on which an array of concentric circles is printed. The centers of the circles in image frame are identified with geometry constraints, with which the homographies between the calibration plane, image plane and projector plane are estimated. The method uses color information to separate the image of projected circles and that of the circle patterns on calibration plane, which reduces the number of required images and simplifies the calibration procedure. To avoid manual intervention, cross-ratio invariance is used to match concentric circles automatically. Experimental results prove that the algorithm is simple and efficient.

Key words: calibration; active vision system; projector; structured light; concentric circle; 3D reconstruction

1 引言

单相机单投影仪构成的结构光主动视觉系统由于其非接触、高分辨率、高精度等优点被广泛应用在三维测量、质量检测、虚拟现实、机器人导航等各个领域. 相比由双摄像机构成的双目立体视觉系统, 主动视觉系统能够产生高密度点云, 解决了双目视觉中图像特征点匹配的问题. 摄像机和投影仪的标定是主动视觉系统应用中最基本和重要的一环.

摄像机和投影仪的标定精度决定三维重建的精度. 其中摄像机标定起步较早, 包括基于标定物的标定方法和自标定方法, 区别在于前者需要借助具有特定

形态特征的标定物, 而后者只需提供摄像机某种运动状态下的场景图像序列即可完成摄像机标定^[1-5]. 主流的基于标定物的方法大多选择平面作为标定物, 主要包括 Tsai 等提出基于棋盘格图案的两步法^[1], Zhang 提出的棋盘格标定算法^[2]以及 Kim 等提出的同心圆摄像机标定算法^[3]等.

投影仪一般被看作逆光路的相机, 投影仪标定的最大的难点在于获取特征点世界坐标. 最常见的解决办法是将投影图案投射到用于标定摄像机的标定物上, 根据标定物上已知的特征点和已标定的摄像机参数矩阵求投影点的世界坐标. 这种方法需要事先标定摄像机^[6-9], 因此摄像机标定误差会叠加加入投影仪标定

误差中导致投影仪标定误差增大. 另一种途径是向包含若干特征点的标定物上投影编码结构光^[10,11], 运用相位技术求出特征点在投影平面上的坐标点. 这种方法不需事先标定摄像机, 但需多次投射正弦光栅, 采集图像数量很大.

投影仪标定的另一个难点在于如何解决投影图案投影到标定板上后与标定板图案重合的问题. 张东等提出向黑白的标定板图案投影彩色圆形标记, 利用 HSV 空间中 H 维(色调)的二值化分离彩色区域和黑白区域^[12]. 该算法将圆形标记在图像上的椭圆形投影的中心当作圆心的投影进行投影仪标定, 但事实上椭圆的中心并非圆心的投影. M Bevilacqua 等则通过计算没有投影仪照射下的标定板图像和投影仪照射下的标定板图像之差分离出投影分量^[13]. 以上的方法均需要分开采集标定板图像和投影图像, 标定过程复杂.

本文提出一种新的基于彩色同心圆阵列的主动视觉系统标定方法. 投影仪向绘制有同心圆阵列的标定板投射彩色同心圆, 通过颜色通道滤波从采集图像中分离出投影同心圆分量和标定板同心圆分量. 利用同心圆投影所满足的几何约束计算圆心在图像上的像素坐标, 建立标定平面、投影仪投影平面以及摄像机成像平面之间的单应关系, 进而实现系统标定. 本文还提出了一种基于交比不变性的同心圆自动匹配算法, 实现了信息处理自动化. 本文算法最少仅需三幅图像, 相比现有算法减少了图像采集数量, 提高了投影仪标定精度. 实验结果表明本文算法操作简单, 标定精度较高.

2 投影仪模型

投影仪投影过程和摄像机成像过程原理相同方向相反, 通常采用反向针孔相机模型作为投影仪的数学模型. 投影仪由光心和投影平面组成, 光心在投影平面上的垂直投影点称为主点. 投影仪坐标系定义如下: 坐标原点位于光心, z 轴垂直于投影平面并指向投影平面, x 轴与 y 轴分别与投影平面 u 轴和 v 轴方向平行. 投影平面上一点 q 与投影仪光心形成一条空间投影光线. 该投影光线上的任意一三维点 Q 与二维点 q 的图像坐标之间的转换关系为:

$$q \sim K_p [R \ t] Q \quad (1)$$

其中 q 和 Q 分别为图像点和三维点的齐次坐标; R 和 t 分别为投影仪坐标系到世界坐标系的旋转矩阵和平移向量, 即投影仪的外部参数; K_p 是投影仪的内部参数矩阵, 由下式给出:

$$K_p = \begin{bmatrix} \alpha & \gamma & u_0 \\ 0 & \beta & v_0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

式中, 参数 α 、 β 、 γ 与镜头焦距、发光单元尺寸及其变形

有关, $[u_0, v_0]$ 为主点坐标. 由于在主动视觉系统中投影仪具有较长的焦距且照相机一般使用标准镜头, 镜头畸变相对较小, 本文暂不考虑镜头畸变的影响. 投影仪镜头畸变的测量和矫正是我们未来工作重点.

3 主动视觉系统标定

本文利用基于平面的方法同时进行摄像机和投影仪的标定, 标定场景设置如图 1 所示. 借助一个白色背景绘有洋红色同心圆阵列的标定板(图中仅象征性地画出了一组同心圆), 投影仪向标定板投影黄色背景的青色同心圆阵列. 摄像机采集投影后的标定板图像, 采集图像中标定板上绘制的同心圆阵列和投影仪投影到标定板上的同心圆阵列重叠在一起. 算法首先利用颜色信息从采集图像中分离出标定板同心圆的图像分量和投影到标定板的同心圆的图像分量. 计算各同心圆环圆心的图像坐标, 并用 DLT 算法分别计算标定板与摄像机成像平面之间的单应 H_{wc} 以及摄像机成像平面与投影仪投影平面之间由标定板平面引起的单应 H_{cp} . H_{wc} 和 H_{cp} 都是 3×3 的非奇异矩阵, 表示两个平面之间的二维投影变换.

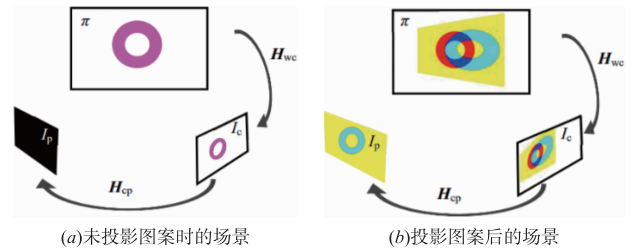


图1 标定场景设置

在得到 H_{wc} 和 H_{cp} 后, 标定板平面的虚圆点 (circular points) $I = [1, i, 0]^T$ 和 $J = [1, -i, 0]^T$ 在摄像机成像平面上的像素坐标 I'_c, J'_c 以及在投影仪投影平面上的像素坐标 I'_p, J'_p 可通过下式得到

$$I'_c = H_{wc} I; J'_c = H_{wc} J \quad (2)$$

$$I'_p = H_{cp} I'_c; J'_p = H_{cp} J'_c \quad (3)$$

改变标定板位置和方向以获得最少三组不同平面虚圆点在摄像机和投影仪上的像素坐标, 拟合出绝对圆锥曲线 (the absolute conic) 在摄像机成像平面和投影仪投影平面中的图像 (image of the absolute conic)^[14] ω_c 和 ω_p . 通过对 ω_c 和 ω_p 进行 Cholesky 分解分别得到摄像机和投影仪的内部参数矩阵 K_c 和 K_p , 并利用 H_{cp} 、 H_{wc} 、 K_c 、 K_p 求得摄像机投影仪的外部参数矩阵.

3.1 图像预处理

图像预处理的目的是从采集的图像中分离出标定板上绘制的同心圆图像分量和投影到标定板上的同心圆图像分量. 本文使用绘制有 7×9 洋红色同心圆阵列的白色标定板, 投影图像为黄色背景的 7×9 青色同心

圆阵列,分别如图 2(a)和 2(b)所示.当投影图像被投射到标定板上时,标定板图案和投影图案重叠在一起,并且投影图案照亮的区域会发生颜色变化,如图 2(c)所示.其中洋红同心圆与黄色背景相交部分呈现出红色;洋红同心圆与青色同心圆相交部分则变成蓝色;标定板白色背景与投影图案相交部分均变成投影图案的颜色.

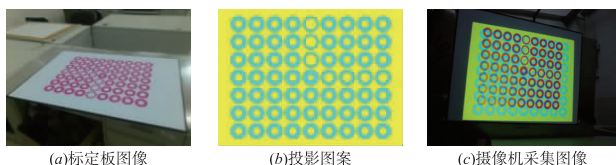


图2 投影图案和标定板图案

为了从采集的图像中分离出标定板同心圆图像分量 and 投影同心圆图像分量,首先将图像分别通过绿色、红色和蓝色通道,滤波后的图像分别记为 Img_g 、 Img_r 和 Img_b ,其中下标 r 、 g 和 b 分别表示经过红、绿和蓝通道滤波.处理结果如图 3 所示.在图像 Img_g 中,由于标定板同心圆标记区域不存在绿色分量因而该区域接近黑色,其他区域则接近白色,由此分离出标定板同心圆阵列的成像.在图像 Img_r 中,被投影到标定板上的青色同心圆区域由于不存在红色分量而变成接近黑色,而黄色背景部分和标定板上的红色同心圆则变成接近白色.在图像 Img_b 中,被投影到标定板上的黄色背景区域和标定板上的红色同心圆区域由于不存在蓝色分量而变成接近黑色,而投影的青色同心圆部分则变成接近白色.

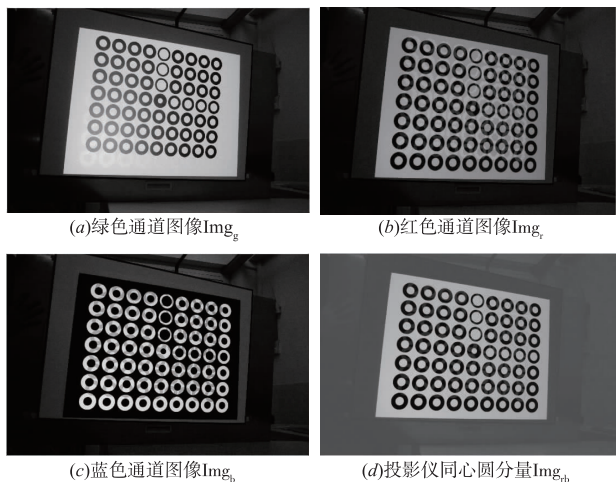


图3 颜色通道处理结果

从图 3 可以看出,图像 Img_g 从采集的图像中较好地分离出了标定板同心圆分量.而图像 Img_r 和 Img_b 中残余的标定板同心圆分量对图像质量有较大的影响.为了消除该影响,我们用下式计算投影同心圆图像分量 Img_{nb} : $\text{Img}_{nb} = \xi_1 \text{Img}_r + \xi_2 (255 - \text{Img}_b) + \xi_3 (255 - \text{Img}_g)$

其中系数 ξ_1 、 ξ_2 用于平衡 Img_r 和 Img_b 中的投影同心圆分量,而系数 ξ_3 用于去除残留的标定板同心圆分量.本文根据经验设置 $\xi_1 = 0.6$ 、 $\xi_2 = 0.4$ 、 $\xi_3 = -0.1$,分离效果如图 3(d) 所示.

3.2 同心圆圆心在相机中的像素坐标

为了计算标定板(投影仪投影平面)与摄像机成像平面之间的单应,需要计算标定板同心圆标记的圆心(投影到标定板同心圆的圆心)的图像坐标.本节详细介绍一种新的同心圆圆心投影坐标的计算方法.

设空间中有一个平面 π , π 上有一对圆心为 O 的同心圆 C_1 、 C_2 . π 上的任一点 x 相对圆 C_1 的极线 l 的向量形式为 $l = C_1 x$, 而该极线 l 相对圆 C_2 的极点为 $x' = C_2^{-1} l$. 由于 C_1 和 C_2 是同心圆,根据圆锥曲线的极点与极线的定义,无论 x 是在圆上、圆内或是在圆外, xx' 的连线均经过圆心.图 4 说明了同心圆对的极点与极线约束.

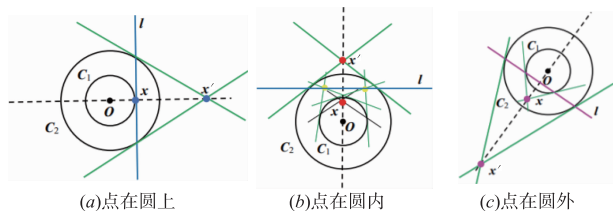


图4 同心圆的极点与极线约束

平面 π 经过投影变换 H 映射到摄像机成像平面 π_c 上,设 C_1 、 C_2 在 π_c 上的对应圆锥曲线分别为 Q_1 和 Q_2 , 圆心 O 在 π_c 上的对应点为 O' . 设平面 π_c 上任意点 x_i 相对于圆锥曲线 Q_1 的极线为 l'_i , l'_i 相对于圆锥曲线 Q_2 的极点为 x'_i . 由于共线关系和极点极线关系具有投影不变性, x_i 与 x'_i 的连线经过圆心 O 在 π_c 上的投影点 O' . 若将 x_i 与 x'_i 的连线记为 m_i , 则

$$m_i = (m_{i1} \ m_{i2} \ m_{i3})^T = x_i \times Q_2^{-1} Q_1 x_i \quad (4)$$

本文采用非线性优化的方法计算圆心投影点的坐标. 圆心投影点的规格化齐次坐标记为 $u = (u, v, 1)^T$, 圆心投影点到直线 m_i 的距离 d_i 可以表示为:

$$d_i^2 = \frac{(m_i \cdot u)^2}{m_{i1}^2 + m_{i2}^2 + m_{i3}^2} \quad (5)$$

在圆锥曲线 Q_1 上任意取 n 个点,利用 Levenberg-Marquardt 算法搜索代价函数 $f(u, v) = \sum_{i=1}^n d_i^2$ 的局部极小值点,得到最优化的圆心投影位置. 其中 u 的初始值可通过计算任意两条直线 m_i 和 m_j 的交点得到.

3.3 投影仪和摄像机内外部参数的计算

标定板平面与摄像机成像平面之间的单应 H_{wc} 可由式(6)表示:

$$O'_i \sim H_{wc} O_i \quad (6)$$

其中 $O_i = (x_i, y_i, 1)^T$ 为标定板上绘制的同心圆圆心在标定板坐标系中的坐标, $O'_i = (u_i, v_i, 1)^T$ 为 O_i 投影点的图像坐标. 计算 4 组或以上标定板同心圆圆心的图像坐标并利用 DLT^[14] 算法计算出 H_{wc} .

而投影仪投影的同心圆在经过由标定板平面引起的单应后被映射到摄像机的成像平面上. 同样地在计算出 4 组或以上投影同心圆圆心对应的图像点的坐标后, 可计算投影仪投影平面与摄像机成像平面之间由标定板引起的单应 H_{cp} . 获得 H_{wc} 和 H_{cp} 后, 利用本节开头所述方法计算出摄像机和投影仪内部参数矩阵 K_c 和 K_p .

下面介绍摄像机和投影仪外部参数的计算. 不失一般性, 我们定义世界坐标系 $O_w X_w Y_w Z_w$ 为右手系, 坐标原点 O_w 位于标定板平面上且 $X_w - Y_w$ 平面与标定板平面重合. 设标定板上一个点 X 在世界坐标系中的齐次坐标为 $X_w = (x_w, y_w, 0, 1)^T$, 它在摄像机上的像点 $x_c = (u_c, v_c, 1)^T$ 满足:

$$x_c \sim K_c [R_c | t_c] X_w \quad (7)$$

将点 $X_w = (x_w, y_w, 0, 1)^T$ 对应的二维平面坐标记为 $x_w = (x_w, y_w, 1)^T$, 并用 r_{c1}, r_{c2} 分别表示 R_c 的前两列, 则有 $K_c [R_c | t_c] X_w = K_c [r_{c1}, r_{c2}, t_c] x_w$. 带入(7)式有:

$$x_c \sim K_c [r_{c1}, r_{c2}, t_c] x_w \quad (8)$$

若 r_{c1}, r_{c2}, t_c 不共面, 即标定板平面不经过摄像机光心, 则标定板平面与摄像机图像平面之间存在单应 H_{wc} . 由式(8)可知

$$H_{wc} \sim K_c [r_{c1}, r_{c2}, t_c] \quad (9)$$

由式(9)可求得 r_{c1}, r_{c2}, t_c . 由于 R_c 为单位正交矩阵有

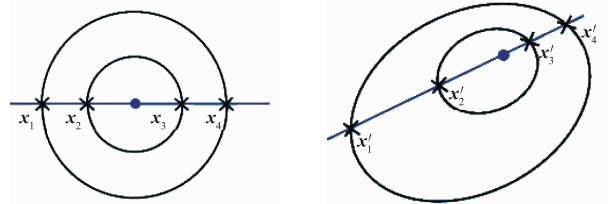
$$r_{c3} = r_{c1} \times r_{c2} \quad (10)$$

由于标定板平面与投影仪投影平面之间的单应 $H_{wp} = H_{cp} H_{wc}$, 用同样的方法可以求出投影仪坐标系相对于世界坐标系的旋转矩阵 R_p 和平移向量 t_p . 摄像机坐标系和投影仪坐标系之间的旋转矩阵 R 和平移向量 t 则可分别表示为 $R = R_c^{-1} R_p$ 和 $t = R_c^{-1} (t_p - t_c)$.

3.4 同心圆图像的自动提取和匹配

本文采用基于 Canny 算子的亚像素边缘检测算法^[15] 提取圆边界并拟合二次圆锥曲线. 对于每一幅图像中检测出的大量圆锥曲线, 首先利用同心圆秩约束^[3] 找出来自同一同心圆环的圆锥曲线对. 设 A_1 和 A_2 为从某幅图像中检测出的两条圆锥曲线, 它们的广义特征值分别为 λ_1, λ_2 和 λ_3 . 如果 $\lambda_1 = \lambda_2 = \lambda_3$, 则 A_1 和 A_2 为同一条圆锥曲线; 如果 $\lambda_1 = \lambda_2 \neq \lambda_3$, 则 A_1 和 A_2 是某对同心圆的投影; 如果 $\lambda_1 \neq \lambda_2 \neq \lambda_3$, 则 A_1 和 A_2 来自不同的同心圆.

在将圆锥曲线配对之后, 还需将标定板上的同心圆与图像中的曲线对进行匹配. 本文利用交比不变性进行同心圆自动匹配. 如图 5 所示, 设同心圆直径所在



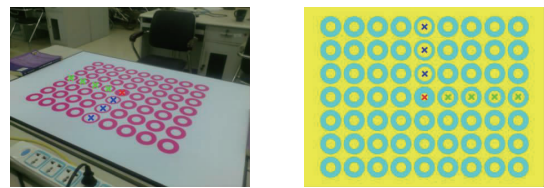
(a)同心圆直径上的交比 (b)经过投影变换后的交比
图5 同心圆中的交比约束

直线与同心圆交于 x_1, x_2, x_3, x_4 四个点, 经过投影变换映射到 x'_1, x'_2, x'_3, x'_4 . 根据交比不变性, 有以下关系

$$\begin{aligned} \text{cross}(x_1, x_2, x_3, x_4) &= \frac{|x_1 x_2| |x_3 x_4|}{|x_1 x_3| |x_2 x_4|} = \frac{|x'_1 x'_2| |x'_3 x'_4|}{|x'_1 x'_3| |x'_2 x'_4|} \\ &= \text{cross}(x'_1, x'_2, x'_3, x'_4) \end{aligned} \quad (11)$$

其中 $|x_i x_j|$ 是点 x_i 到点 x_j 的距离^[14]. 对于不同半径比的同心圆, 直径所在直线与同心圆的四个交点形成的交比是不同的, 因此半径比可用于标识同心圆.

为唯一地标识阵列中的每一个同心圆, 在设计标定板图案及投影图案时, 将位于正中心以及 x/u 轴和 y/v 轴正方向的所有同心圆设置特殊的半径比, 如图 6 所示. 图中用交叉点标出设置了特殊半径比的圆环.



(a) 标定板图案 (b) 投影图案
图6 同心圆阵列图案中特殊位置设置特殊半径比

本文采用下面算法实现同心圆阵列自动匹配:

- (1) 根据交比检测出阵列中心处的同心圆、阵列 x 轴正方向上的四组同心圆以及 y 轴正方向上的三组同心圆的投影;
- (2) 利用上一步得到的圆心投影求出原平面与成像平面之间的粗略的单应矩阵, 用此单应矩阵求出其他圆心投影的粗略预测位置;
- (3) 距离粗略预测位置最近的圆心投影, 视为该组同心圆圆心的投影点.

4 实验和结果

为验证本文算法, 搭建了一个由单摄像机和单投影仪组成的主动视觉系统. 系统采用 Sony VPL-CX21 投影仪, 图像分辨率为 1024×768 , 投影尺寸为 $40 \sim 300$ 英寸, 投影距离约为 $1\text{m} \sim 7.6\text{m}$; 摄像机采用 Fuji FinePix X100, 分辨率为 3072×2048 的彩色 CMOS 数码相机, 镜头的等效焦距为 35mm . 采集图像处理和主动视觉系统标定过程均在 Matlab 上进行. 标定板尺寸为 $594\text{mm} \times$

840mm. 实验一共采集了 18 幅标定板位于不同位置的投影图像.

表 1 列出了系统内外部参数的标定结果, 其中 θ_x , θ_y 和 θ_z 为投影仪坐标系相对与相机坐标系在 x, y 和 z 三个方向上的旋转角度, $[t_x, t_y, t_z]$ 为相机光心在投影仪坐标系中的坐标.

表 1 标定实验结果

内部参数	摄像机	投影仪	外部参数	投影仪
α (像素)	3083	1873	θ_x ($^\circ$)	7.62
β (像素)	3088	1892	θ_y ($^\circ$)	19.90
γ	3.37	2.79	θ_z ($^\circ$)	-2.42
u_0 (像素)	1533	502	t_x (mm)	-400
v_0 (像素)	1012	812	t_y (mm)	-106
			t_z (mm)	189

根据主动视觉系统的标定结果, 利用投影图案和采集图像的圆心阵列的对应关系对投影仪投影到标定板上的所有同心圆圆心对应点进行三维重建, 再用重建点拟合各个方位下的标定板, 得到标定板的 18 个方位重建结果. 图 7 显示了重建的圆心三维坐标到拟合平面的距离, 其均方根误差为 0.9989mm, 平均误差为 0.7673mm.

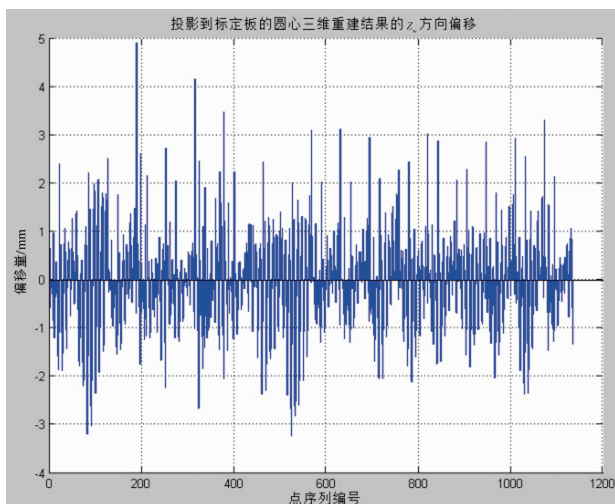
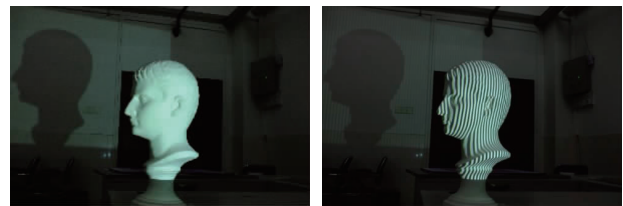


图7 拟合平面误差分布

主动视觉系统标定完成后对图 8(a) 所示的石膏像进行了扫描和三维重建. 结构光编码采用正反图像格雷编码, 投影仪向石膏头像依次投射 22 帧正反图像格雷编码结构光, 图 8(b) 显示了其中一幅观测图像.

对石膏头像的三维重建点云赋予全白采集图像中相应点的颜色信息, 得到石膏头像的重建结果如图 9 所示. 由试验结果可见, 本文提出的算法重建效果良好, 证明了本文标定算法的有效性.



(a)用于三维重建的石膏头像 (b)一幅原始采集图像

图8 重建石膏头像实验的编码图像



图9 石膏头像的三维重建图

5 结论

本文提出的主动视觉系统标定方法利用颜色信息从图像中分离投影同心圆图像分量和标定板同心圆图像分量, 根据同心圆投影满足的几何约束计算圆心的像素坐标, 建立标定平面、投影平面以及成像平面之间的单应关系, 实现系统标定. 同时利用交比不变性实现同心圆自动匹配. 本文算法仅需单个标定板, 具有标定设备简单、采集图像少、无需人工干预的优点. 实验结果表明本文算法操作简单标定精度较高, 具有实用价值.

参考文献

- [1] Tsai R Y. A versatile camera calibration technique for high-accuracy 3D machine vision metrology using off-the-shelf TV cameras and lenses[J]. IEEE Journal of Robotics and Automation, 1987, 3(4): 323 - 344.
- [2] Zhang Z. A flexible new technique for camera calibration [J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2000, 12(11): 1330 - 1334.
- [3] Jun-Sik Kim, Pierre Gurdjos, In-So Kweon. Geometric and algebraic constraints of projected concentric circles and their applications to camera calibration[J]. IEEE Transaction on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2005, 25(4): 78 - 81.
- [4] Stephen J Maybank, Olivier D Faugeras. A theory of self-calibration of a moving camera[J]. International Journal of Computer Vision, 1992, 8(2): 123 - 151.
- [5] 邓磊, 陈宝华, 赖伟良, 等. 三维监控系统中基于三维重构的交互式标定[J]. 电子学报, 2017, 45(3): 527 - 533. Deng Lei, Chen Baohua, Lai Weiliang, et al. Interactive cali-

- brating 3D surveillance system based on 3D reconstruction [J]. Chinese Journal of Electronics, 2017, 45 (3): 527 - 533. (in Chinese)
- [6] Xiao-jun Jia, Zhi-jiang Zhang, Qing-cang Yu. Construction for M-arrays and application in structured light[J]. Journal of Shanghai University (English Edition), 2011, 15(1): 63 - 68.
- [7] Zhang S, Huang P S. Novel method for structured light system calibration [J]. Optical Engineering, 2006, 45 (8): 083601-1 - 083601-8.
- [8] 李中伟, 史玉升, 钟恺, 王从军. 结构光测量技术中的投影仪标定算法[J]. 光学学报, 2009, 29(11): 3061 - 3065.
Li Zhongwei, Shi Yusheng, Zhong Kai, Wang Congjun. Projector calibration algorithm for the structured light measurement technique[J]. Acta Optical Sinica, 2009, 29(11): 3061 - 3065. (in Chinese)
- [9] 韦争亮, 钟约先, 袁朝龙, 等. 单相机单投影仪三维测量系统标定技术[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2009, 49(2): 202 - 205.
Wei Zhengliang, Zhong Yuexian, Yuan Chaolong, et al. Calibration of a 3D measurement system having one camera and one projector[J]. Journal Tsinghua University (Sci&Tech), 2009, 49(2): 202 - 205. (in Chinese)
- [10] Antonio Vald'es, Jos'e Ignacio Ronda. Camera autocali-
bration and the calibration pencil [J]. Journal of Mathematical Imaging and Vision, 2005, 23(2): 167 - 174.
- [11] Fei Jianfeng, Bi Dexue, Wang Yongqiang, Xu Zengpu, Yu Demin. Research on online calibration of projector based on projecting 2D planar target [J]. Transducer and Microsystem Technologies, 2008, 27(4): 34 - 37.
- [12] 张东, 唐立新. 基于彩色圆形标记投射的投影仪标定方法[J]. 计算机与数字工程, 2011, 39(4): 123 - 127.
Zhang Dong, Tang Lixin. A method of calibrating projector based on projecting color circular marks [J]. Computer and Digital Engineering, 2011, 39(4): 123 - 127. (in Chinese)
- [13] M Bevilacqua, C Liguori, A Paolillo. Stereo calibration for a camera-projector pair [A]. 2010 IEEE Instrumentation and Measurement Technology Conference (I2MTC 2010) [C]. Austin; IEEE, 2010. 492 - 497.
- [14] Hartley R, Zisserman A. Multiple View Geometry in Computer Vision [M]. UK: Cambridge University Press, 2000. 40 - 58.
- [15] Xue Wu, Zhang Yongsheng, Dong Guangjun, Ji Song, Yu Ying. An edge-detection method of sub-pixel based on canny operator [J]. Remote Sensing Information, 2013, 28(1): 5 - 11.

作者简介



李 燕 女, 1975 年 10 月出生, 安徽合肥人. 暨南大学计算机科学系副教授, 博士. 研究方向: 计算机视觉, 图像处理.
E-mail: yanlics@qq.com



严永财 男, 1989 年 6 月出生, 广东惠州人. 毕业于暨南大学计算机科学系, 获硕士学位. 现就职于快手科技有限公司(深圳). 研究方向: 计算机视觉.