

# 多投影仪自由立体显示系统中的特征点检测及几何校正

罗建利, 秦开怀, 周艳霞

(清华大学计算机系, 北京 100084)

**摘 要:** 几何校正是多投影仪自由立体显示系统实现无缝拼接显示的关键, 而特征点检测是多投影仪组合显示进行几何校正的基础. 自由立体显示系统中三维立体显示屏幕的各向异性反射特性使得基于亮度阈值分割的特征点检测方法效果不佳, 为此, 我们提出了基于轮廓检测的特征点检测方法: 采用基于 Hough 变换的圆检测方法检测特征点的位置, 以特征点集的凸包为基准插入及补充漏检的特征点, 然后使用两次最小二乘直线拟合方法矫正误差. 最后, 利用特征点网格, 实现了自由立体显示系统的几何校正. 实验证明, 我们的特征点检测方法鲁棒性好, 精度较高, 自动地实现了投影显示图像的高精度几何校正.

**关键词:** 特征点检测; Hough 变换; 圆检测; 最小二乘直线拟合; 几何校正

**中图分类号:** TP391.41      **文献标识码:** A      **文章编号:** 0372-2112 (2010) 08-1729-07

## Feature-Point Detection and Geometry Calibration for an Autostereoscopic Tiled Display System Using Multiple Projectors

LUO Jian-li, QIN Kai-huai, ZHOU Yan-xia

(Department of Computer Science and Technology, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

**Abstract:** Geometry calibration is a key step to the seamless display of an autostereoscopic tiled display system using multiple projectors, but the robust detection of feature points is more important because the geometry calibration is based on the feature-point detection. Due to the anisotropic refraction characteristics of lens sheets for an autostereoscopic display screen, it is very difficult to find a threshold for the threshold-based method to segment those feature images well. In this paper, we propose a robust feature-point detection method for the autostereoscopic tiled display system using multiple projectors. It first detects feature points with the circle detection method based on Hough transform, then, the convex hull of the feature points is computed; undetected feature points are added into the feature-point mesh, and the coordinates of the feature points are updated twice by the linear least square fitting to minimize the errors; and last, based on the feature-point mesh, the geometry calibration is performed for the autostereoscopic tiled display system using multiple projectors. The experimental results show that our feature-point detection approach is robust and precise enough for the geometry calibration.

**Key words:** feature point detection; Hough transform; circle detection; linear least square fitting; geometry calibration

### 1 引言

自由立体 (autostereoscopic) 显示技术是指不需佩戴诸如立体眼镜等附属设备的三维立体显示技术. 它可以避免佩戴附属设备所带来的恶心、头晕等不适感. 多投影仪自由立体显示系统是由多个投影仪投射多个视点图像, 并由光学屏幕分离多个视区提供深度线索的自由立体显示系统. 多投影仪自由立体显示系统的显示区域大, 沉浸效果好, 适合多用户, 应用前景十分广阔<sup>[1-3]</sup>.

我们研制的多投影仪自由立体显示系统由光学显示屏幕、24 台投影仪、计算机集群绘制子系统以及用于几何和亮度校正的照相机构成. 光学显示屏幕为前投式光学显示屏幕, 由柱透镜光栅和反射介质装配而成. 24 台投影仪同时投射 8 个视点图像于光学显示屏幕上, 每个视点图像由 3 台投影仪采用 1 行 × 3 列的组合拼接方式显示. 具有各向异性反射特性的光学显示屏幕将 8 个视点图像向不同方向反射, 形成视区. 当用户左右眼同时处于相邻两个视点图像的视区时, 左右眼看到的图像的视

差通过大脑融合产生立体视觉。

## 2 问题

组合显示墙技术采用几何校正方法<sup>[4]</sup>将多个投影仪的显示画面耦合为无缝、一致的大画面。几何校正方法的一般步骤为:(1)计算机驱动投影仪轮流显示并用照相机拍摄特征点图像(见图 1)。特征点图像为类似棋盘的特征点网格;(2)特征点检测。首先选取亮度阈值对图像二值化<sup>[5]</sup>,使特征点区域亮度为 1,其余区域亮度为 0。其次计算所有亮度为 1 的区域的 centroid 坐标,得到特征点坐标。然后对特征点排序并插入到二维网格数组中,使之与计算机缓存图像中的特征点网格一一对应;(3)求出照相机空间中特征点坐标到计算机缓存空间中特征点坐标的齐次变换矩阵  $H$ 。显示时,根据齐次变换矩阵对投影的图像进行实时纹理变形,使多个投影后的图像在屏幕上拼接为一个完整、一致的高分辨率图像。

多投影仪自由立体显示系统中光学屏幕的各向异性光学反射特性增加了几何校正的困难,而其中的关键问题为特征点检测问题,原因在于:

(1)多投影仪组合显示系统中,传统特征点检测方法采用基于亮度阈值分割法,而多投影仪自由立体显示系统的光学屏幕为非朗伯漫射面,它具有各向异性反射特性,其各向异性的反射特性使阈值设定成为困难,其反射光强度的主峰值位于柱透镜光栅主瓣对光线的反射方向,次峰值则处于柱透镜光栅的副瓣对光线的反射方向,处于主峰与次峰之间的其它方位的反射亮度很低。因此在光学显示屏幕前的不同方位观察到同一副图像的亮度差值非常大。多投影仪自由立体显示系统中,投射不同视点图像的投影仪的安装位置和它们投射的光线对屏幕的入射方向是互不相同的,因此光栅对不同的投影仪反射的主峰和次峰方向也互不相同。所以在同一固定点拍摄的不同投影仪投射的特征点图像的亮度差距很大,很难为所有的特征点图像找到一个统一的亮度阈值将背景和特征点分割。

(2)柱透镜光栅表面的镜面反射、漫反射现象,进一步增加了设定阈值的难度。柱透镜光栅表面的镜面反射在屏幕上形成珍珠链带形高亮反射带(见图 1 中上部多条亮带)。此外光栅的表面入射光线的漫反射增加了图像的背景亮度,如图 1 屏幕中部区域的背景亮度较高,由此导致右侧的特征点亮度相对暗淡。高亮带侵蚀特征点区域,而高亮度的背景使某些观察位置的特征点亮度差距很小,即特征点图像中高亮带的亮度与特征点的亮度存在重叠,因此对单幅图像难以设定一个统一的亮度阈值将背景和特征点分割。

(3)投影仪投射的部分特征点显示在屏幕区域外

而无法检测。多投影仪自由立体显示系统大部分投影仪投射方式是斜投影。在我们系统中投影仪光轴与屏幕垂线的最大的夹角为  $26^\circ$ 。斜投影方式带来显示图像的变形。斜投影的投影仪显示区域为上小下大的四边形。为使系统的显示区域尽量大,要求投影区域的宽度较小的一端尽量覆盖大屏幕相应方向的最大尺寸。而宽度大的下部显示区域则可以适当超出屏幕(如图 1 中右侧的部分特征点显示在屏幕外)。屏幕外的特征点通过阈值分割法无法检测到。

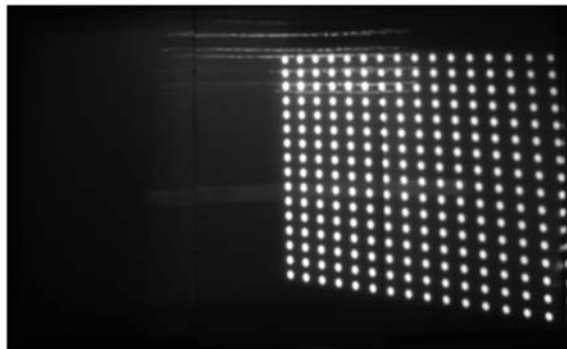


图1 特征点图

(4)实验发现,环境光和照相机的位置的不同会导致照相机拍摄的特征点图像的亮度大幅度波动。因此每一次几何校正无法重用以前设置的亮度阈值,需重新设定。

以上几方面的原因使特征点图像的阈值设定成了一个难题。图 2 为三幅特征点图像及其亮度柱状图,由于亮度柱状图在高亮度区没有明显的波谷及波峰,因此难以通过统计方法设定合适的阈值。在系统先期开发中,我们研究了将每幅特征点图像分成  $m \times n$  个子区域,然后对每个子区域交互设置不同的亮度阈值的方法,但是由于每次几何校正要对每幅特征点图像设定  $m \times n$  个亮度阈值,工作量非常巨大。

总之,由于自由立体显示系统屏幕的特殊的光学特性,使基于亮度阈值分割方法不适合于自由立体显示系统的几何校正。因此,基于圆检测的 Hough 变换算法<sup>[6]</sup>以及最小二乘拟合技术,我们提出了基于轮廓提取的特征点检测方法,它能很好的解决特征点识别问题。在特征点检测时,多投影仪自由立体显示系统必须考虑如下几个问题:

(1)采用基于 Hough 变换的圆检测方法求出的特征点与实际特征点位置存在误差,在后期处理中必须考虑。多投影仪自由立体显示系统中部分投影仪的投影方式为斜投影,投射的特征圆的轮廓形状接近椭圆。精确的方法是采用基于 Hough 变换的椭圆检测方法检测特征点,但是这一般需要进行 5 维投票,其所需的存储空间和时间十分巨大,对投影仪阵列的几何校正来说

这是不能接受的.一个合理的替代方案就是:采用基于 Hough 变换的圆检测方法近似检测特征点位置,然后在

后期处理中尽量消除其误差的影响.

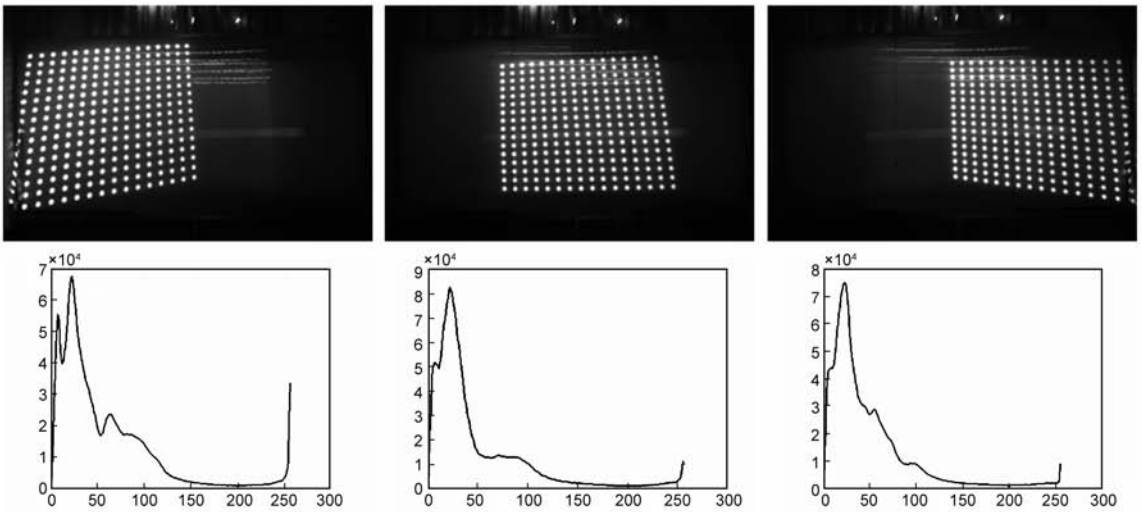


图2 三幅特征点图像及其对应的亮度柱状图.第二排图像为第一排对应位置的图像的亮度柱状图

(2)需补充漏检测的特征点.部分特征点受高亮带污染变形而不能被检测,需补充.

(3)特征点检测方法需处理误检测点的问题.采用基于 Hough 变换的圆检测时可能将部分闭合高亮带或噪声误检测为特征点.

直线方程,然后求出特征点到拟合直线的距离.距离大于一定阈值的特征点为出格点,出格点的误差大,因此不参与第二次最小二乘直线拟合.第二次对删除出格点后的特征点进行最小二乘直线拟合,拟合的直线的交点为矫正后的特征点位置.使用拟合方法可以消除随机噪声、照相镜头桶形畸变和圆检测误差.此外删除出格点再进行最小二乘拟合可以提高拟合的直线的精度.

(4)在排序中采用双线性插值方法补充漏检测点,然后使用最小二乘拟合矫正,解决了漏检测点问题.

### 3.1 特征点位置检测

首先对图像进行预处理,然后采用 canny 算子提取图像中轮廓线,再跟踪图像中的轮廓线,舍弃过短和过长的无效轮廓,并将有效轮廓存入轮廓堆栈中,最后对每条轮廓线采用 Hough 变换检测圆心位置.

我们采用圆形均值滤波模板对图像进行预处理.对于形状为圆的轮廓线,圆均值滤波具有好的效果,它能有效地消除图像中噪声和琐碎的细节并桥接曲线的缝隙.图 4a、b 和 c 为无滤波预处理和采用圆均值模板滤波后提取的轮廓线对比图.从图 4 中可知,圆均值滤波具有非常好的过滤特性,能够过滤大部分噪声和细节,同时圆均值滤波可以保持圆特征的轮廓.

圆均值模板比矩形均值模板有更好的保持圆轮廓形状的特性.表 1 为不同过滤模板预处理的圆轮廓特征保持对比结果.我们分别对特征点图像采用无滤波预处理、直径为 11 的圆均值模板滤波预处理和窗口宽度为 11 的方形均值模板滤波预处理,然后采用 canny 算子提取轮廓线,并交互地删除非圆轮廓以外的轮廓线,最后对保留的特征圆轮廓进行对比.圆形均值模板滤波预处理提取的轮廓像素有 13695 个像素与无滤波预

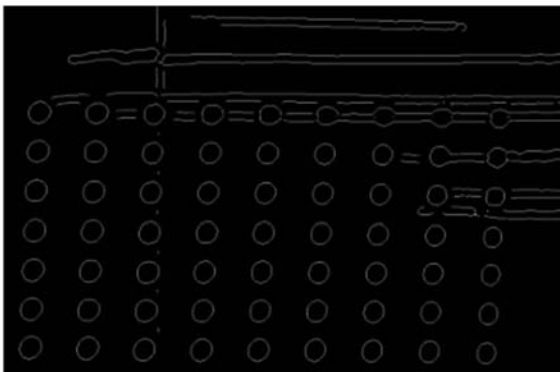


图3 特征点局部高亮带污染特征点图.第一排右侧特征点被高亮带的轮廓连接为一个长条形

### 3 基于轮廓检测的最小二乘拟合特征点检测方法

我们提出的基于轮廓的特征点检测法采用基于 Hough 变换的圆检测方法检测特征圆,使用两次最小二乘直线拟合方法对特征点位置进行矫正,其特点有:

(1)采用圆均值滤波模板预处理,由此带来良好的噪声滤波特性和轮廓保持特性,减少了后续轮廓跟踪及基于 Hough 变换的圆检测处理的时间和误差.

(2)采用 canny 算子<sup>[7]</sup>提取轮廓线,然后基于 Hough 变换进行圆检测.

(3)采用两次最小二乘直线拟合方法对特征点位置进行矫正.第一次使用最小二乘拟合特征点网格中

处理提取的轮廓相同, 占总轮廓像素的 81% 多, 而方形均值模板滤波则为 10689 个像素, 占其总轮廓像素 65%

多. 由此可以看出圆形均值模板滤波比方形均值模板滤波更能保持特征圆轮廓.

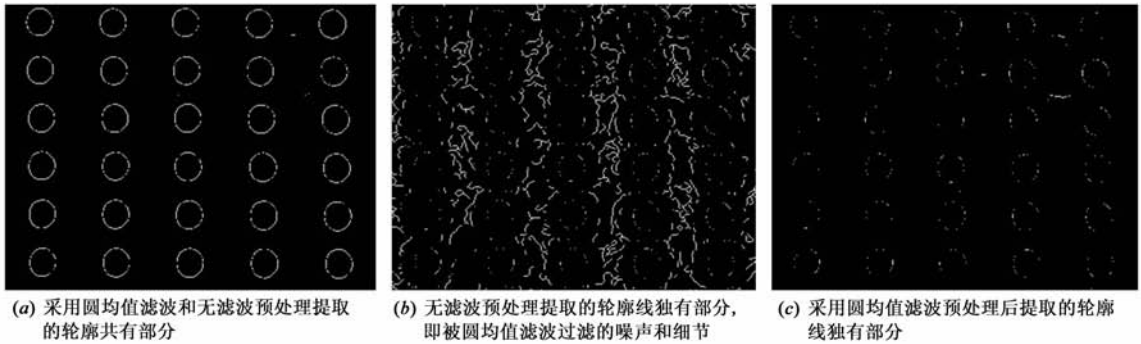


图4 无滤波预处理与采用圆均值滤波预处理后提取的轮廓线对比图

表 1 直径为 11 的圆形均值模板滤波与窗口宽度为 11 的方形均值滤波的轮廓特征保持对比结果

	提取的特征圆轮廓像素总数 $S$	与无滤波预处理后提取的轮廓相同的像素总数 $m$	与无滤波预处理后提取的轮廓相异的像素总数 $S - m$	滤波预处理轮廓保持的像素数百分比 $m/S$
无滤波	16800	/	/	/
圆形均值滤波	16796	13695	3101	81.537%
方形均值滤波	16270	10689	5581	65.697%

圆均值滤波模板参数为圆半径, 半径太小则过滤的细节信息少, 半径太大将改变特征圆的轮廓, 我们的经验值为  $r = \text{ceil}(R/2.0 + 0.5)$ , 其中  $r$  为滤波模板的半径,  $R$  为特征圆平均半径,  $\text{ceil}(X)$  表示取大于  $X$  的最小整数.

在经过圆均值模板滤波预处理后, 采用 canny 算子提取轮廓线, 然后跟踪轮廓线中像素点. 首先按从上至下, 从左到右的顺序对图像搜索, 找到轮廓的左上边界点, 然后从该边界点开始按照广度优先顺序跟踪并记录轮廓上所有像素点. 最后根据特征圆周长范围设定阈值, 将周长在阈值范围内的轮廓放入有效轮廓集合中, 否则放入无效轮廓集合中. 图 5(a) 为轮廓跟踪得到的有效轮廓, 它包含了大部分特征圆的轮廓, 图 5(b) 为检测到的无效轮廓. 可以发现第三排右侧有两个特征圆的轮廓由于受高亮带污染而变为无效轮廓.

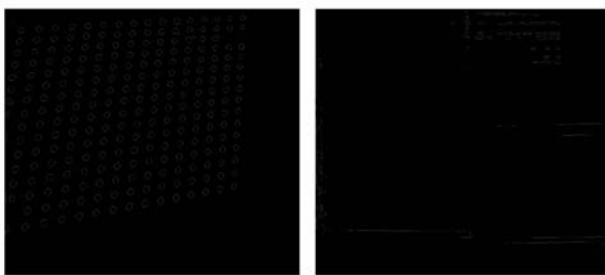


图5 轮廓跟踪结果

提取轮廓线后, 对有效轮廓采用基于 Hough 变换的检测圆方法检测特征点. Hough 变换对轮廓的每个像素点进行投票, 从而得到圆心位置和半径. 为了节省存储空间和时间, 对每个轮廓检测圆心和半径, 不必在整个

图像范围内投票, 可缩小圆心  $(a, b)$  的投票范围. 投影仪斜投影方式下的特征圆为非标准圆, 将 Hough 变换的圆检测方法用于检测特征点, 求出的特征点位置与轮廓的中心位置有误差. 图 6 为基于 Hough 变换的圆检测结果, 当轮廓的长短轴比例接近 1 时, 检测的圆心坐标偏差小; 但当长短轴比例大于 1 时, 圆心坐标偏差大. 为此, 我们采用最小二乘拟合直线求交方法来校正误差.

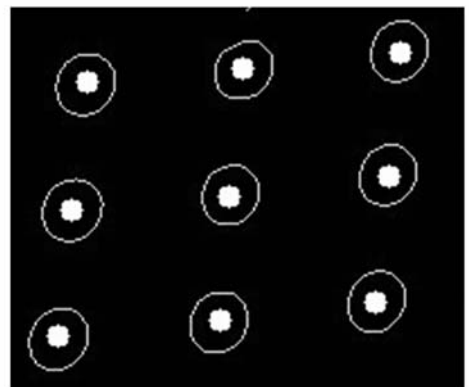


图6 基于Hough变换的圆检测结果, 圆心为检测对应特征圆轮廓的特征点

特征点位置检测带来以下问题: 一是特征点漏检测—由于部分特征点的轮廓受高亮带污染变为无效轮廓, 这些特征点轮廓无法参与圆检测因此被漏检测. 二是特征点误检测—一部分闭合高亮带和噪声被圆检测方法误检测为特征圆, 产生特征点无检测问题. 三是圆检测引入的误差, 我们的解决方法是在第二步特征点网格排序过程中, 通过在直线中插入和补充点, 补充漏检测点和排除误检测点, 在第三步中利用两次最小二乘直线拟合矫正特征点, 从而完成对误差的校正.

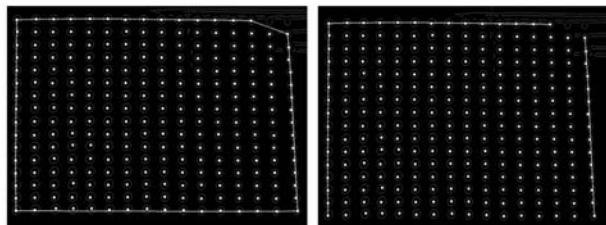
### 3.2 特征点网格排序插入

接下来要将检测到的特征点排序并插入到特征点网格中,从而可以与帧缓存中的图像网格中的特征点一一对应.特征点网格排序插入方法为:

(1)采用递增式算法计算特征点集的凸包(见图 7(a)),其时间复杂度为  $O(n \log n)$  [8]

(2)首先在凸包中查找特征点网格的上水平线、左侧竖直线、右侧竖直线,然后分别插入及补充三条直线上的特征点,即将直线上特征点存储到网格二维数组的正确位置.

上水平线为凸包边中斜率小且边的起点位于凸包的左上角的边,而左侧竖直线和右侧竖直线为与上水平线夹角接近  $90^\circ$  且边的端点位于凸包左右两侧的两条直线(见图 7(b)).



(a) 特征点集的凸包 (b) 在凸包边中找到的特征点网格中上水平线及左右侧竖直线

图7

插入目标直线上的特征点方法为:遍历特征点集并判断当前点是否与目标直线中已插入的任意两点共线.如当前点与目标直线上已插入的任意两点共线则认为当前点位于目标直线上,将当前点插入到目标直线中.设目标直线为网格中第  $i$  行,目标直线上已找到  $j$  个点,当前点为  $P$ ,网格二维数组为  $\text{mesh}[n][n]$ .将当前点插入到目标直线中,即  $\text{mesh}[i][j] = P$ .

在圆检测过程中部分特征点被漏检测,因此需要补充目标直线上的特征点.补充目标直线上的特征点的方法为:首先计算目标直线上漏检测点个数及位置.网格中直线上点间的间距是线性变化的,因此根据相邻点的距离可以计算出相邻两点之间漏检测点个数.然后采用双线性插值法补点.双线性插值可能带来误差累积,使补充特征点偏离实际位置.补充的特征点误差大不适宜参与下步的最小二乘直线拟合,为此将此补充点标识为备用点.

(3)插入和补充网格中下一条水平线上的特征点,然后以上水平线及第二条水平线为基础构造第 2 到第  $n-1$  条竖直线,最后插入和补充这些竖直线上特征点.

至此,已经插入和补充上水平线、左右侧竖直线(第 1 及第  $n$  条竖直线)上所有特征点.接下来,利用左右侧竖直线上有效点构造第二条水平线,并插入和补充网格中第二条水平线上特征点.在左右侧竖直线上

选取对应点俱为有效点的位置,设为  $j$ .第  $j$  条水平线的起点和终点为左侧竖直线上和右侧竖直线上  $j$  点.然后采用插入及补充第  $j$  条水平直线上所有点.以第 1 条及第  $j$  条水平线为基础,分别连接两条直线上第 2 到第  $n-1$  点得到第 2 到第  $n-1$  条竖直线.并插入和补充第 2 到第  $n-1$  条竖直线上特征点.最后随着所有竖直线上所有点被插入或补充,得到一个完整的网格.

图 8 为直线插入补充顺序示意图.先插入及补齐上水平线、左侧竖直线、右侧竖直线上特征点,其次插入及补齐第二条水平线上特征点,然后插入及补齐第 2 到第  $n-1$  条竖直线上特征点.

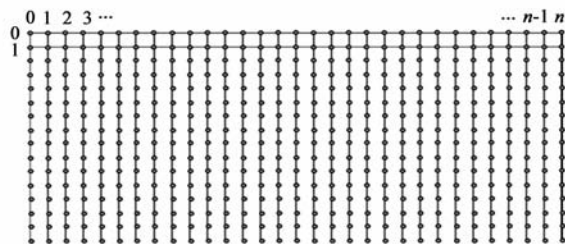


图8 网格直线插入补充顺序示意图

### 3.3 两次最小二乘直线拟合矫正特征点

噪声、桶形畸变、圆检测等引入的误差及双线性插值带入的累积误差使网格上的点可能偏离直线,为了减少误差,有必要采用数值方法进行拟合和矫正.我们采用两次最小二乘拟合直线方法可以对有效点进行矫正.

首先第一次采用最小二乘拟合网格中的直线(水平线或竖直线),设直线方程为  $ax + by - c = 0$ ,直线上的有效点集为  $\{P_1, P_2, P_3 \dots P_n\}$  则有:

$$AX = 0$$

$$\text{其中: } A = \begin{bmatrix} x_1 & y_1 & -1 \\ x_2 & y_2 & -1 \\ \cdot & \cdot & \cdot \\ x_n & y_n & -1 \end{bmatrix}, X = \begin{bmatrix} a \\ b \\ c \end{bmatrix}$$

采用奇异值<sup>[9]</sup>分解方法求出  $X$  的最小二乘解.然后计算网格上点到拟合直线的距离,如距离超过一个阈值则视为出格点.我们认为出格点是由于噪声、桶形畸变、特征点位置检测引入的误差导致部分特征点偏差网格中直线太大,这些出格点影响拟合后直线方程的精度,因此要避免它参与最小二乘直线拟合,为此将出格点从有效点集合中删除.

然后第二次使用更新后的有效点集进行第二次最小二乘拟合,求出直线方程.最后对网格中直线求交,交点即为矫正后的特征点位置.

## 4 自由立体显示系统中的几何校正

自由立体显示系统的几何校正<sup>[10]</sup>不仅要求显示一个视图图像的多台投影仪的显示区域通过几何校正组

合为一个对齐的大虚拟显示区域,同时要求不同视点图像间的大虚拟显示区域间对齐.我们的几何校正方法为:

(1)控制自由立体显示系统的投影仪依次投影特征点图像,并用高分辨率数字照相机在一固定位置拍摄其图像(称为照相机空间中的图像),然后采用上述方法检测特征点.为了便于描述,对投影仪依次编号并记为  $P_i$ ,相应于  $P_i$  的帧缓存中的特征点记为  $F_B^i$ ,照相机空间中的特征点记为  $F_C^i$ ,则有:

$$F_C^i = M^i \times F_B^i$$

其中  $M^i$  为  $F_C^i$  到  $F_B^i$  的  $3 \times 3$  齐次变换矩阵.

(2)求出自由立体显示系统中照相机空间中所有投影仪的显示区域的最大公共显示区域,并按照等距离原则细分公共显示区域,求出公共细分网格中点与投影区域覆盖该点的所有投影仪中帧缓存中对应点位置.为了便于描述,记公共细分网格中第  $j$  点为  $V_C^j$ ,投影区域覆盖  $V_C^j$  的投影仪集合为  $S_j = \{P_{j1}, P_{j2}, \dots, P_{jn}\}$ ,设对应  $V_C^j$  帧缓存中的第  $i$  点的位置为  $V_B^i$ ,则有:

$$V_C^j = M^i V_B^i$$

(3)求出  $V_C^j$  对应的纹理坐标.设所有投影仪的显示区域的最大公共显示区域的长和宽分别为  $W_C, H_C$ ,其左下角的坐标为  $(x_C^0, y_C^0)$ ,设  $V_C^j$  的坐标为  $(x_C^j, y_C^j)$ ,其对应的纹理坐标为  $(Tex\_x^j, Tex\_y^j)$ ,则有:

$$\begin{cases} Tex\_x^j = (x_C^j - x_C^0) / W_C \\ Tex\_y^j = (y_C^j - y_C^0) / H_C \end{cases}$$

(4)在显示中通过二次渲染实时几何校正.第一次渲染时将帧缓存中图像拷贝到纹理内存中,然后将纹理映射到几何校正网格中进行第二次渲染.纹理映射为以  $V_B^i$  为三角形网格顶点坐标,以  $(Tex\_x^j, Tex\_y^j)$  为纹理坐标绘制网格.

## 5 实验结果

我们的方法是在 VC 上实现的,其中圆形均值模板对图像过滤和 canny 算子提取图像中轮廓线是通过在 VC 中调用 MATLAB 完成.图 9 为采用上述特征点检测方法的检测结果,图 10 为亮度阈值分割方法求出的特征点与采用本文特征点检测方法结果对比图.其中,‘o’为采用本文特征点检测方法求出的特征点位置,‘x’为采用亮度阈值分割方法求出的特征点位置,直线为采用亮度阈值分割方法求出的网格线.从图中可以看出采用亮度阈值分割方法求出的网格线分布误差大,间距不一致,第 13、14、15 条竖直网格线间距差大;此外基于亮度阈值分割方法的特征点误差大,表 2 为基于亮度阈值分割方法的特征点的误差.可以看出采用本文特征点检测方法求出的网格线分布均匀,特征点的误

差小.图 11 采用本文方法的多投影仪自由立体显示系统同时投影 8 个视点位置相同的图像结果,其中每个视点图像由三台投影仪采用 1 行  $\times$  3 列的组合拼接方式显示.从图中可以看出 8 幅图像通过几何校正精确对齐,具有非常好的效果(屏幕中的两条竖直线为屏幕缝隙).

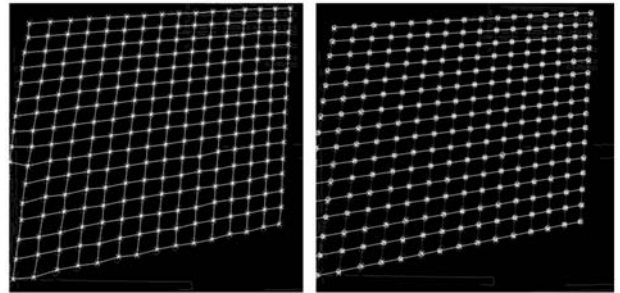


图 9 检测结果  
(a) 特征点网格排序插入后结果, ‘x’为特征点位置  
(b) 两次最小二乘直线拟合矫正特征点后结果.其中 ‘x’为特征点网格排序插入后得到的特征点位置, ‘o’为矫正后的特征点位置

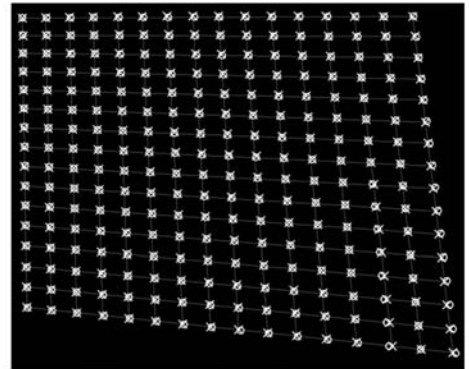


图 10 亮度阈值分割方法求出特征点与采用本文方法特征点对比图. ‘o’为采用本文方法求出的特征点位置, ‘x’为采用亮度阈值分割方法求出的特征点位置, 直线为亮度阈值分割方法求出的网格线



图 11 采用本文方法的多投影仪自由立体显示系统同时投影 8 个视点位置相同的图像结果

表 2 亮度阈值分割方法求出特征点的误差

特征点与网格距离最大差值 (像素)	特征点与网格平均距离 (像素)
5.8	2.48

我们的方法能够解决多投影仪自由立体显示系统中特征点检测和几何校正问题.本文方法已经被用于我们研制的高分辨率多投影仪自由立体显示系统中,具有很好的鲁棒性,能够自动地实现了投影显示图像

的高精度几何校正.

#### 参考文献:

- [1] Lewis J D, Verber C M, McGhee R B. A true three-dimensional display[J]. IEEE Trans Electron Devices 1971, 18(9): 724 - 732.
- [2] Leung MS, Ives NA., Eng G. Three-Dimensional Real-Image Volumetric Display System and Method [P]. US patent: US005745197. 1998.
- [3] Kim II., Korevaar EJ., Hakakha H. Three-dimensional volumetric display in rubidium vapor[A]. Proceedings of SPIE [C], San Jose, CA, USA: SPIE, 1996. 274 - 284.
- [4] Brown M S, Seales W B. Incorporating geometric registration with PC-cluster rendering for flexible tiled displays [J]. International Journal of Image and Graphics, 2004, 4(4): 683 - 700.
- [5] 周然. 基于 PC 集群的高分辨率投影墙矫正和应用[D]. 杭州: 浙江大学, 2006: 23 - 28.  
Zhou R. On the Geometry Calibration and Application of High Resolution Tiled Display Wall Based on PC Cluster [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2006: 23 - 28 (in Chinese).
- [6] Chuan T., Chung K.. An efficient randomized algorithm for detecting circles[J]. Computer Vision and Image Understanding, 2001, 83: 172 - 191.
- [7] Canny J. A computational approach to edge detection[J]. IEEE Trans Pattern Analysis and Machine Intelligence, 1986, 8(6): 679 - 698.
- [8] Mark D. 著, 邓俊辉 译. 计算几何: 算法与应用[M]: 第二版, 清华大学出版社, 2005: 7 - 9.
- [9] 蔡大用, 白峰杉. 现代科学计算[M]. 北京: 科学出版社, 2000: 11 - 14.

[10] 袁国栋. 多投影显示墙关键技术研究[D]. 北京: 清华大学, 2008: 16 - 36.

Yuan G.. The Research on Key Technology of Multi-Projector Tiled Display Wall [D]. Beijing: Tsinghua University, 2008: 16 - 36. (in Chinese)

#### 作者简介:



罗建利 男 1974 年生于湖南省茶陵县. 现为清华大学计算机系博士研究生. 主要研究方向为自由立体显示、虚拟现实.



秦开怀(通信作者) 男, 1958 年生于湖北潜江. 教授, 博导, 主要研究方向为计算机图形学、计算机辅助几何造型学、数字图像处理、虚拟现实、组合投影显示, 自由立体显示技术等.  
E-mail: qkh-des@tsinghua.edu.cn.



周艳霞 女, 1976 生于河北省东光. 现为清华大学计算机系博士研究生, 石家庄陆军指挥学院讲师. 主要研究方向为组合投影显示.