

中图法分类号: TP391.9 文献标志码: A 文章编号: 1006-8961(2011)02-0293-07

论文索引信息: 张军, 王邦平, 李晓峰. 针对多投影仪显示墙画面校正的图像对准技术[J]. 中国图象图形学报, 2011, 16(2): 293-299

针对多投影仪显示墙画面校正的图像对准技术

张军¹⁾, 王邦平¹⁾, 李晓峰^{1),2)}

¹⁾(四川大学计算机学院图形图像研究所, 成都 610064) ²⁾(四川大学视觉合成图形图像技术国防重点学科实验室, 成都 610064)

摘要: 针对多投影仪显示墙画面校正问题中相机与投影仪间图像对准问题, 提出一种基于自适应细分网格的稀疏对应点加密方法, 可以得到任意光滑屏幕上投影图像与相机图像间的像素级对应关系。该方法利用改进的自适应4点插值细分曲线思想构造细分网格方法, 可以将投影仪图像与相机图像间稀疏对应点网格加密到任意精度, 从而建立从相机到投影仪图像间的像素级一一映射关系, 为多投影仪显示墙系统的几何和色彩校正提供精确的图像对准基础。与现有算法的对比分析和虚拟机场塔台仿真系统中的实际应用表明, 该方法具有较高的图像对准精度, 并且无显式的需求投影仪、投影屏幕和相机的内部参数。

关键词: 图像对准; 多投影仪显示墙; 自适应细分网格; 曲面投影

Method of image alignment for calibration of multi-projector displays

Zhang Jun¹⁾, Wang Bangping¹⁾, Li Xiaofeng^{1),2)}

¹⁾(Institute of Image & Graphic, Department of Computer Science, Sichuan University, Chengdu 610064 China)

²⁾(Key Laboratory of Fundamental Synthetic Vision Graphics and Image for National Defense, Sichuan University, Chengdu 610064 China)

Abstract: A practical image alignment method based on self-adapting subdivision mesh is proposed, which can align the projector imagery on arbitrary smooth curved screen with camera image. It is designed for calibration problem of multi-projector displays. Using sparse initial corresponding points between the frame buffer of projector and the image of camera, the proposed method can subdivide it into arbitrary precision. Hence, the one to one correspondence of pixels between the frame buffer of projector and image of camera can be established. This correspondence can be used as the foundation of methods for the calibration problem of multi-projector displays. Comparative analysis of existing algorithms and real applications on virtual airport control tower simulation system show that the proposed method can align images more accurately, without any explicit prior knowledge of projector, camera and screen.

Keywords: imagery alignment; multi-projector displays; self-adapting subdivision mesh; projection on curved surface

0 引言

随着商业、娱乐和科学研究等领域对超大屏幕、高分辨率显示的需求不断上升, 多投影仪显示墙(multi-projector displays)技术成为备受关注的研究热点, 并发展出许多优秀的商业系统^[1-3]。精确的几何校正和色彩校正是实现多投影仪显示图像无缝拼接

的关键技术, 其基础是建立投影仪图像和用于校正的相机图像间对准关系。

早期借助人眼进行手工校正的工作即繁琐又缺乏精度, 已经逐渐退出了多投影仪显示墙画面校正技术领域, 而转向借助数字相机作为监视工具进行画面校正^[1]。利用相机作为监视工具进行投影仪画面校正的基础是建立相机图像与投影仪图像间像素级对应关系。如果投影屏幕是平面, 则该对应关系可通过

收稿日期: 2009-07-16; 修回日期: 2009-10-19

基金项目: 国家高技术研究发展计划(863)项目(2007AA01Z328)。

第一作者简介: 张军(1978—), 男, 四川大学计算机学院博士研究生, 主要研究方向为计算机视觉、计算机图形学。

E-mail: mecca_zj@163.com。

4 个对应点建立的仿射变换得到^[2-5]。对于非平面的投影屏幕, Ramesh 等人^[6]针对二次曲面屏幕的几何校正问题给出了一个基于二次变换的图像对准算法, 利用一对立体视觉相机预先标定投影仪和相机, 并估计二次曲面的参数; Philippe 等人^[7]针对屏幕曲面方程和投影仪内部参数未知的情况, 采取结构光密集采样和分片线性插值的方式计算投影图像变形的映射关系; Harville 等人^[8]的方法利用三角网格和纹理映射技术建立投影图像和相机图像间的对应关系, 其本质依旧是分片线性插值思想。Bhasker 等人^[9]针对镜头畸变对几何校正产生误差的问题给出了基于有理 Bezier 曲面网格的修正方法, 在平面屏幕环境下取得较好效果, 但不适用于曲面屏幕。

实际工程中, 投影仪镜头、相机镜头、曲面投影等因素产生的投影图像变形是许多非线性映射的叠加, 很难用线性或分片线性的方式建立模型, 并不能满足一些带有任意曲面屏幕的多投影仪显示墙系统画面校正的需求。同时, 对带有大范围曲面屏幕的多投影仪显示墙系统, 目前采用密集采样加分片线性插值的方法需要非常繁琐和耗时的初始采样步骤, 严重限制了其实际应用。

提出一种基于细分网格加密技术的相机图像到投影仪图像对准方法, 利用初始稀疏对应点网格即可自适应建立投影仪帧缓存图像与相机拍摄图像间像素级的一一映射关系, 达到图像对准的目标。该方法大大简化了已有画面校正算法的初始采样点数量, 能适应带有任意光滑屏幕的多投影仪显示墙系统, 这是本文方法最大的特点。

1 多投影仪显示墙画面校正技术基础

利用相机作为监视设备的多投影仪显示墙画面校正技术的基础是寻找投影仪帧缓存图像与相机中实际投影在屏幕上图像之间每个像素点的对应关系(如图 1)。在此基础上, 其几何校正和色彩校正才能得以实施。

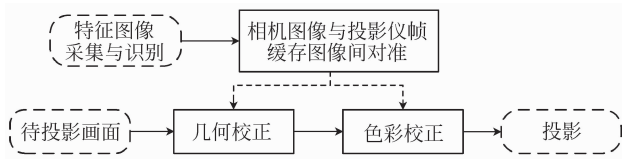


图 1 多投影仪显示墙画面校正技术流程图

Fig. 1 The Process flow chart of calibration of multi-projector displays

设 $(cx, cy)^T$ 表示相机捕捉图像中的某像素坐标, $(px, py, pz)^T$ 为实际投影到曲面上的空间中的一个点坐标。由于相机在成像过程中也可能产生形变, $(px, py, pz)^T$ 与 $(cx, cy)^T$ 之间存在一个非线性映射关系:

$$f_1: \mathbf{R}^3 \rightarrow \mathbf{R}^2, \text{ 即 } (cx, cy)^T = f_1(px, py, pz).$$

其几何意义如图 2 所示。

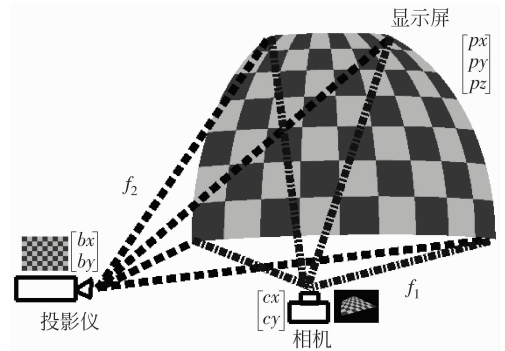


图 2 投影图像变形特征测量方法示意图

Fig. 2 Illustration for measuring the warping pattern of projected image

设 $(bx, by)^T$ 表示投影仪帧缓存图像中的某像素坐标, 投影屏幕上点 $(px, py, pz)^T$ 与 $(bx, by)^T$ 之间同样是一个非线性映射关系:

$$f_2: \mathbf{R}^2 \rightarrow \mathbf{R}^3, \text{ 即 } f_2(bx, by) = (px, py, pz)^T.$$

可以通过 $(px, py, pz)^T$ 将相机图像与投影仪帧缓存图像对应起来。

$$(bx, by)^T = f_2^{-1}[(px \ py \ pz)^T] = f_2^{-1}\{f_1^{-1}[(cx \ cy)^T]\} = g(cx, cy) \quad (1)$$

式中 $g = f_2^{-1}f_1^{-1}$ 。

现有多投影仪显示墙画面校正方法需要精确知道 $(cx, cy)^T$ 与 $(bx, by)^T$ 间的映射关系 g , 这在投影屏幕为任意光滑曲面时是一件十分困难的事。通过投影特征图形(如棋盘格图、线条图等^[10]), 可以得到稀疏的特征点间对应关系:

$$\{p_{ij}^{(0)} = (cx_{ij}, cy_{ij})^T \leftrightarrow (bx_{ij}, by_{ij})^T = q_{ij}^{(0)}\}_{i,j=1}^{m^{(0)}, n^{(0)}}$$

如果有算法能根据 g 的特性将稀疏对应点加密到像素级精度:

$$\{p_{ij}^{(k)} = (cx_{ij}, cy_{ij})^T \leftrightarrow (bx_{ij}, by_{ij})^T = q_{ij}^{(k)}\}_{i,j=1}^{m^{(k)}, n^{(k)}}$$

则可建立 $(cx, cy)^T$ 和 $(bx, by)^T$ 之间的一一对应关系。设投影仪帧缓存图像为

$$I_{\text{buffer}} = \{I_{\text{buffer}}(bx, by)\}_{bx=0, by=0}^{M, N}$$

$$\text{相机图像为 } I_{\text{camera}} = \{I_{\text{camera}}(cx, cy)\}_{cx=0, cy=0}^{M', N'}$$

$$\begin{aligned} \text{则有 } \mathbf{I}_{\text{buffer}}(bx, by) &\leftrightarrow \mathbf{I}_{\text{camera}}(cx, cy) \\ (bx, by)^T &= \mathbf{q}_{i',j'}^{(k)} \leftrightarrow \mathbf{p}_{i,j}^{(k)} = (cx, cy)^T \end{aligned} \quad (2)$$

所以,带有任意光滑屏幕的多投影仪显示墙画面校正技术的基础是一个具有自适应能力的对应点网格加密技术,即将已经得到稀疏对应点关系加密到稠密的对应点关系。

20 世纪 90 年代以来,细分曲线、曲面造型技术得到迅猛发展。作为一种离散化方法,细分曲线、曲面方法结合了多边形造型和 NURBS 样条造型的优点,其算法简洁、稳定,得到广泛的应用。本文在文献 [11] 的细分网格加密算法基础上,进一步通过调整各网格点细分参数取值来达到局部自适应加密的效果。

2 基于细分网格的图像对准技术

假设已经得到两图像间稀疏的对应点关系(关于初始特征点对应网格的获取方法不是本文的重点,可参见文献 [10-11]),在此基础上通过细分网格自适应的加密此稀疏对应点网格,达到稠密的像素级图像对准的要求。

2.1 自适应细分网格加密技术

可将矩形域上网格看成是由两个正交方向上的曲线族,记为

$$\mathbf{U}_i^{(k)} = \{ \mathbf{p}_{i0}^{(k)} \quad \mathbf{p}_{i1}^{(k)} \quad \cdots \quad \mathbf{p}_{in^{(k)}}^{(k)} \} \quad (i = 0, 1, \dots, m^{(k)})$$

$$\mathbf{V}_j^{(k)} = \{ \mathbf{p}_{0j}^{(k)} \quad \mathbf{p}_{1j}^{(k)} \quad \cdots \quad \mathbf{p}_{m^{(k)}j}^{(k)} \} \quad (j = 0, 1, \dots, n^{(k)})$$

式中 $\mathbf{U}_i^{(k)}$ 为第 i 条 u 线, $\mathbf{V}_j^{(k)}$ 为第 j 条 v 线, $\mathbf{p}_{ij}^{(k)} = (x_{ij}^{(k)}, y_{ij}^{(k)})^T \in \mathbf{R}^2$ 为网格格点。整个网格记为 $\mathbf{M}^{(k)}$, k 表示细分次数。

在每个网格个点加入一个细分参数 $\omega_{ij}^{(k)}$, 将 2 维网格拓广为 3 维网格:

$$\bar{\mathbf{M}}^{(k)} = \{ \mathbf{p}_{ij}^{(k)} = (\mathbf{p}_{ij}^{(k)T}, \omega_{ij}^{(k)})^T \in \mathbf{R}^3 \}_{i,j=1}^{m^{(k)}, n^{(k)}}$$

沿 u/v 两个方向分别构造自适应 4 点插值细分曲线来加密网格,图 3 中圆点的构造模式如下:

对于网格中第 i 条 u 线,细分曲线递归地定义

$$\begin{aligned} \bar{\mathbf{U}}_{2i}^{(k+1)} &= \{ \mathbf{p}_{2i,0}^{(k+1)} \quad \mathbf{p}_{2i,1}^{(k+1)} \quad \cdots \quad \mathbf{p}_{2i,2n^{(k)}}^{(k+1)} \} \quad (i=0,1,\dots,m^{(k)}): \\ \begin{cases} \mathbf{p}_{2i,2j}^{(k+1)} &= \mathbf{p}_{i,j}^{(k)} \\ \mathbf{p}_{2i,2j+1}^{(k+1)} &= (1 + \alpha) \left(\frac{\mathbf{p}_{i,j}^{(k)} + \mathbf{p}_{i,j+1}^{(k)}}{2} \right) - \alpha \left(\frac{\mathbf{p}_{i,j-1}^{(k)} + \mathbf{p}_{i,j+2}^{(k)}}{2} \right) \\ \alpha &= (\omega_{i,j}^{(k)} + \omega_{i,j+1}^{(k)})/2 \end{cases} \end{aligned} \quad (3)$$

对于网格中第 j 条 v 线,细分曲线递归地定义

$$\bar{\mathbf{V}}_{2j}^{(k+1)} = \{ \mathbf{p}_{0,2j}^{(k+1)} \quad \mathbf{p}_{1,2j}^{(k+1)} \quad \cdots \quad \mathbf{p}_{2m^{(k)},2j}^{(k+1)} \} \quad (j=0,1,\dots,n^{(k)}):$$

$$\begin{cases} \mathbf{p}_{2i,2j}^{(k+1)} &= \mathbf{p}_{i,j}^{(k)} \\ \mathbf{p}_{2i+1,2j}^{(k+1)} &= (1 + \alpha) \left(\frac{\mathbf{p}_{i,j}^{(k)} + \mathbf{p}_{i+1,j}^{(k)}}{2} \right) - \alpha \left(\frac{\mathbf{p}_{i-1,j}^{(k)} + \mathbf{p}_{i+2,j}^{(k)}}{2} \right) \\ \alpha &= (\omega_{i,j}^{(k)} + \omega_{i+1,j}^{(k)})/2 \end{cases} \quad (4)$$

方程式(3)(4)的几何解释可参看图 3 和图 4。

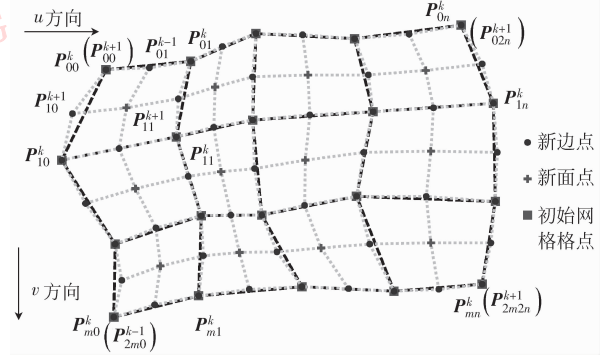


图 3 矩形域上的一个细分网格

Fig. 3 A subdivision grid on rectangular domain

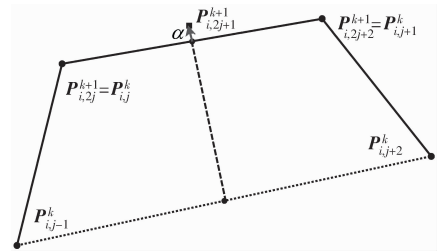


图 4 4 点插值细分曲线构造形式的几何含义

Fig. 4 Illustration of four-point interpolatory subdivision curve

利用式(3)(4),只是沿 u/v 两个方向加密了网格曲线族,并没有形成新的网格,需要加入“面点”(图 3 中标加号点)来构成新加入的 u/v 曲线族。大量实践表明,似 $\{Q_1, Q_2, Q_3, Q_4\}$ 般与其周围邻接点尽可能的构成平行四边形的面点(图 5)具有较好的平衡 u/v 两个方向位移的效果,故 $\mathbf{p}_{2i+1,2j+1}^{(k+1)}$ 取这 4 个点的均值点。

由简单的几何关系可以推出:

$$\mathbf{Q}_1 = \mathbf{p}_{2i,2j}^{(k+1)} + 2 \left(\frac{\mathbf{p}_{2i+1,2j}^{(k+1)} + \mathbf{p}_{2i,2j+1}^{(k+1)}}{2} - \mathbf{p}_{2i,2j}^{(k+1)} \right) =$$

$$\mathbf{p}_{2i+1,2j}^{(k+1)} + \mathbf{p}_{2i,2j+1}^{(k+1)} - \mathbf{p}_{2i,2j}^{(k+1)}$$

类似地可推出 $\mathbf{Q}_2, \mathbf{Q}_3, \mathbf{Q}_4$, 最终

$$\mathbf{p}_{2i+1,2j+1}^{(k+1)} = (\mathbf{Q}_1 + \mathbf{Q}_2 + \mathbf{Q}_3 + \mathbf{Q}_4)/4 =$$

$$\frac{1}{2} (\mathbf{p}_{2i+1,2j}^{(k+1)} + \mathbf{p}_{2i,2j+1}^{(k+1)} + \mathbf{p}_{2i+1,2j+2}^{(k+1)} + \mathbf{p}_{2i+2,2j+1}^{(k+1)}) -$$

$$\frac{1}{4} (\mathbf{p}_{2i,2j}^{(k+1)} + \mathbf{p}_{2i,2j+2}^{(k+1)} + \mathbf{p}_{2i+2,2j}^{(k+1)} + \mathbf{p}_{2i+2,2j+2}^{(k+1)}) \quad (5)$$

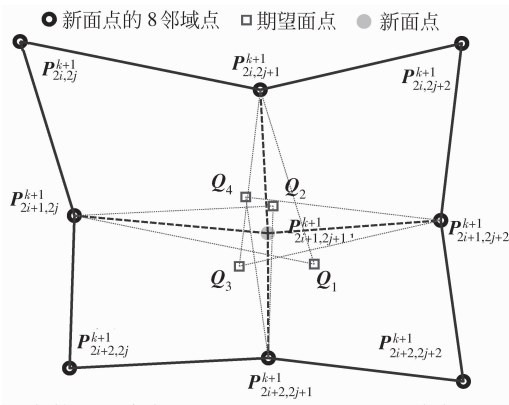


图 5 新面点的几何含义

Fig. 5 Illustration of new face point

可以看到,以尽量满足平行四边形条件为构造目的,得到的式(5)具有清晰的几何意义,即面点为其 8 邻域点的加权平均,并且其 4 邻域点的权系数为 0.5。

由于本文使用的是开网格结构,故存在边界上的点并不能满足式(3)(4),需要特殊处理。为了保持一致的细分模式,并在边界处同样保持原网格的几何形状和疏密分布特征,我们采用镜像的办法将网格内点映射到边界以外,成为虚拟点,消除边界。

设网格中某条 u 曲线的左边界 3 个顶点为 $P_{i1}^{(k)}, P_{i2}^{(k)}, P_{i3}^{(k)}$, 构造虚拟顶点 $P_{i0}^{(k)}$, 使其为 $P_{i3}^{(k)}$ 关于 $P_{i1}^{(k)}, P_{i2}^{(k)}$ 中垂线的镜像, 则

$$P_{i0}^{(k)} = P_{i3}^{(k)} + \frac{2 | (P_{i2}^{(k)} - P_{i3}^{(k)}, P_{i1}^{(k)} - P_{i2}^{(k)}) |}{(\|P_{i1}^{(k)} - P_{i2}^{(k)}\|_2)^2} (P_{i1}^{(k)} - P_{i2}^{(k)}) \quad (6)$$

式中 $(*, *)$ 表示向量内积, $\|*\|_2$ 表示向量的 2 范数, 式(6)的几何意义如图 6, 虚拟边界点 $P_{i0}^{(k)}$ 是 $P_{i3}^{(k)}$ 关于线段 $P_{i1}^{(k)}P_{i2}^{(k)}$ 中垂线的镜像点。 v 线边界的构造式类似。

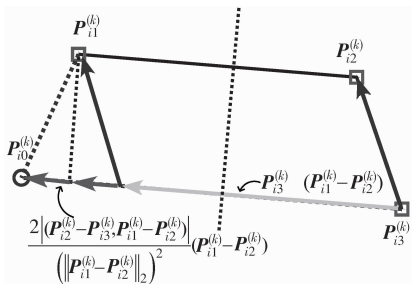


图 6 方程式(6)的几何含义

Fig. 6 Geometric significance of equation (6)

2.2 初始细分参数的确定

设投影仪图像到相机图像间的稀疏特征点对应关系中某初始网格为 $M^{(0)} = \{p_{ij}^{(0)}\}_{i,j=1}^{m^{(0)},n^{(0)}}$, 可根据网格自身的性质来确定自适应细分参数矩阵 $\omega^{(0)} = (\omega_{ij}^{(0)})_{m^{(0)} \times n^{(0)}}$, 以便得到初始拓广后的网格 $\overline{M}^{(0)} = \{P_{ij}^{(0)} = (x_{ij}^{(0)}, y_{ij}^{(0)}, \omega_{ij}^{(0)})^T\}_{i,j=1}^{m^{(0)},n^{(0)}}$ 。

设 $M^{(-1)}$ 为对初始网格 $M^{(0)}$ 进行间隔采样(即只取其奇数行 u/v 线)后的粗网格, 期望通过优化的方式寻找合适的细分参数矩阵 $\omega^{(-1)}$, 使得由 $M^{(-1)}$ 按照式(3)(4)加密一次的结果尽量地逼近 $M^{(0)}$ 。

设 $S(\omega) : M^{(-1)} \xrightarrow{\omega} \{p'_{ij} = (x'_{ij}, y'_{ij})^T\}_{i,j=1}^{m^{(0)},n^{(0)}}$ 即为 $M^{(-1)}$ 在细分参数 ω 下按照式(3)(4)加密一次的结果, 则可寻找最优的 ω 作为细分参数矩阵

$$\omega^{(-1)} = \arg \min_{\omega} \sum_{i=1}^{m^{(0)}} \sum_{j=1}^{n^{(0)}} \|p_{ij}^{(0)} - p'_{ij}\|^2 \quad (7)$$

由于初始网格格点数本身并不多, 间隔采样后格点点数更少, 故式(7)是一个低维最佳平方逼近问题, 可采用一般的数值优化算法求解^[12]。

将式(7)求得的 $\omega^{(-1)}$ 与 $M^{(-1)}$ 结合得到拓广后的粗网格 $\overline{M}^{(-1)} = \{P_{ij}^{(-1)} = (x_{ij}^{(-1)}, y_{ij}^{(-1)}, \omega_{ij}^{(-1)})^T\}_{i,j=1}^{m^{(-1)},n^{(-1)}}$ 并按照式(3)(4)加密一次即可得到拓广后的初始网格 $\overline{M}^{(0)}$ 。

由于投影仪到相机图像间映射 $g(x, y)$ 在投影屏幕为光滑曲面时为 C^1 连续函数, 则根据 Taylor 公式有

$$g(x_0 + \Delta x, y_0 + \Delta y) = g(x_0, y_0) + [g_x(x_0, y_0)\Delta x + g_y(x_0, y_0)\Delta y] + \frac{1}{2!} [g_{xx}(x_0, y_0)\Delta x^2 + 2g_{xy}(x_0, y_0)\Delta x\Delta y + g_{yy}(x_0, y_0)\Delta y^2] + o(\Delta x^2, \Delta y^2) \quad (8)$$

当特征点对应关系网格间隔 $\max(\Delta x, \Delta y) \rightarrow 0$ 时, $g(x, y)$ 接近线性函数。故实际工程实践时, 只需要细分初始稀疏特征点对应网格少量次数(在本文应用实例中细分次数为 5 次), 使网格格点间最大间距小于单个像素的大小, 即可达到较高的画面校正精度。

2.3 图像对准方法

在已经得到图像间稀疏特征点对应关系和 2.1 节提出的自适应细分网格加密算法的基础上, 图像对准计算将在两个达到像素级精度的网格间进行。图 7 给出了针对投影仪图像与相机图像间的对准过程示意图。

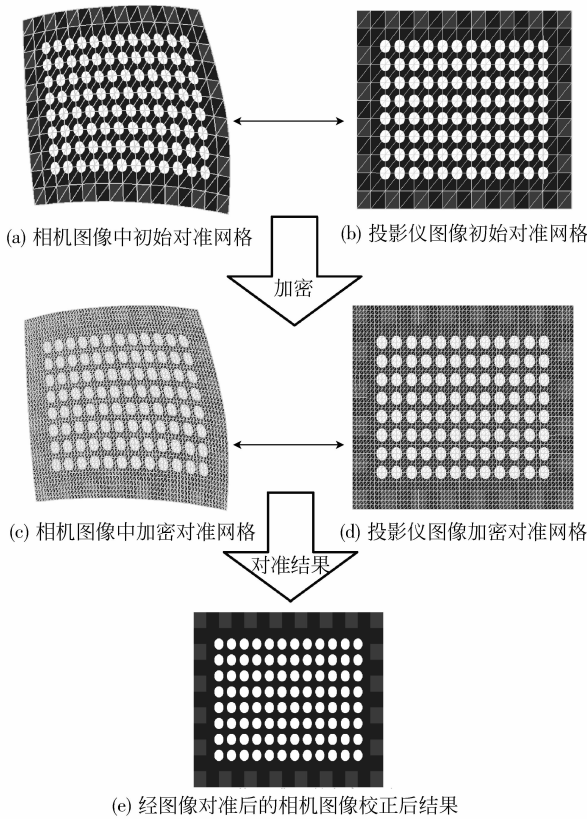


图 7 基于细分网格的图像对准过程示意图

Fig. 7 Illumination for aligning image based-on subdivision mesh

设稀疏的特征点间对应关系为

$$\{p_{ij}^{(0)} = (cx_{ij}, cy_{ij})^T \leftrightarrow (bx_{ij}, by_{ij})^T = q_{ij}^{(0)}\}_{i,j=1}^{m^{(0)}, n^{(0)}}$$

其中相机图像初始网格 $\{p_{ij}^{(0)} = (cx_{ij}, cy_{ij})^T\}$ 见图 7 (a), 投影仪图像中初始网格 $\{(bx_{ij}, by_{ij})^T = q_{ij}^{(0)}\}$ 见图 7 (b)。

利用本文提出的细分网格加密算法将稀疏对应关系加密 k 次 $\{p_{ij}^{(k)} \leftrightarrow q_{ij}^{(k)}\}_{i,j=1}^{m^{(k)}, n^{(k)}}$ (见图 7 (c) (d)), 达到像素级精度, 则可建立投影仪帧缓存图像中任意像素点 $(bx, by)^T$ 到相机图像像素点 $(cx, cy)^T$ 的一一对应关系:

$$q_{i^*, j^*}^{(k)} = \operatorname{argmin} \| (bx, by)^T - q_{i, j}^{(k)} \| \quad (9)$$

$$\Downarrow$$

$$(cx, cy) = \operatorname{argmin} \| (cx', cy')^T - p_{i^*, j^*}^{(k)} \|$$

从而达到图像间对准的目标。

实际上, 由于投影仪投射图像在其帧缓存里是未经任何形变的生成图像, 故其对应网格十分规整, 任意加线性加密算法都可以完成对其的细分加密。故本文算法主要是针对相机图像中已经发生形变的投射在屏幕上的图像。

3 实验结果

实验环境为川大智胜公司机场塔台模拟系统的 24 个 Panasonic SXGA + 7000 DLP 投影仪 (自下向上分 3 层: 10 + 10 + 4) 以及类柱面和类球面组成的混合投影屏幕。该投影屏幕设计成直径 13 m、高 6.5 m, 底部由高 3.8 m 的柱面构成, 顶部由直径 13 m、高 2.7 m 的椭球面构成。实际施工时, 顶部椭球面是由分段圆弧样条为母线的旋转曲面构成, 再使用泥浆涂抹的方式平滑整个屏幕的接缝。同时由于屏幕过大而受重力影响较大, 底部柱面也存在一定程度的形变。最终造成投影屏幕精确形状未知, 只能假定其光滑性。所有实验结果均在一台 CPU 主频为 2.5GHz、2G 内存的 PC 上完成。

为便于自动识别特征点, 建立投影仪图像与相机图像间的稀疏对应点网格, 投影仪投射的是特殊几何图形 (图 8 (a) (b)), 其初始对应点网格为均匀分割的矩形网格 (图 8 (c))。

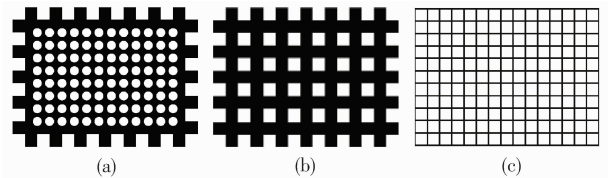


图 8 投影仪投射图像

Fig. 8 Projected images in projector

为验证本文算法能自适应地对任意光滑屏幕上的投影图像进行对准, 分别在虚拟塔台系统屏幕的近似柱面区域、近似椭球面区域和混合曲面区域 (柱面和椭球面过渡区域) 进行测试。利用本文方法得到的像素级图像对准关系, 可以提取相机中投影区域的图像, 并恢复成与投影仪帧缓存分辨率相同的图像, 称之为“投影对准图像”。

图 9 分别给出了相机中的近似柱面区域投影图像和其图像对准结果。由自适应参数矩阵的变化情况也可以看出, 实际加工出的柱面屏幕存在起伏。

图 10 分别给出了相机中的近似椭球面区域投影图像和其图像对准结果。可以看出, 本文加密算法对大形变的网格具有很好的适应性。

图 11 分别给出了相机中的混合曲面区域投影图像和其图像对准结果。由于大尺度的椭球曲面非常难以精确加工, 实际工程中是利用分区域的旋转

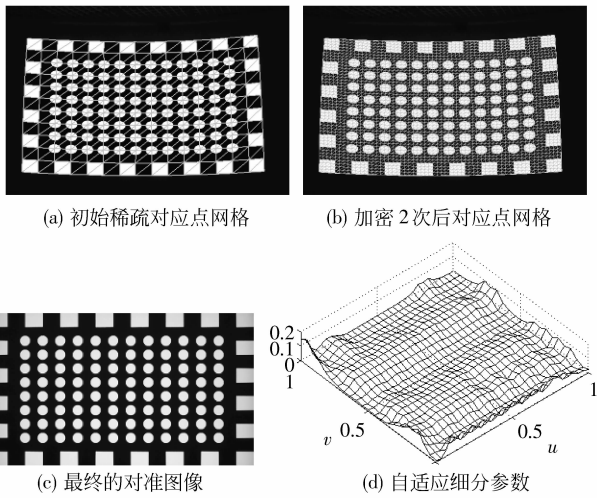


图 9 近似柱面区域投影图像对准效果图

Fig. 9 Results of aligned camera images on approximate cylinder region

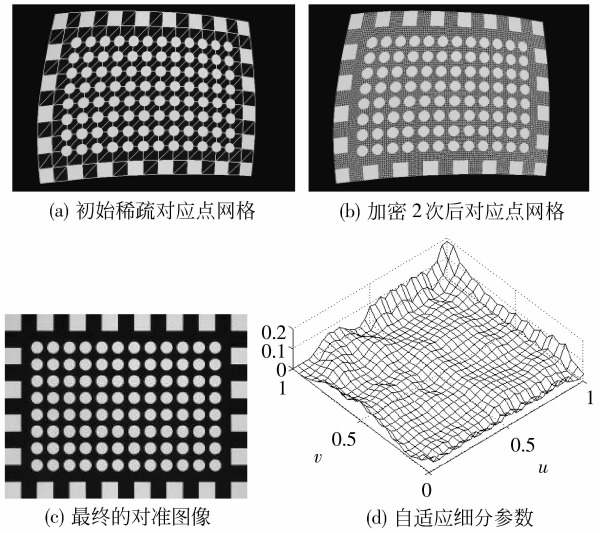


图 11 混合曲面区域投影图像对准效果图

Fig. 11 Results of aligned camera images on hybrid surface region

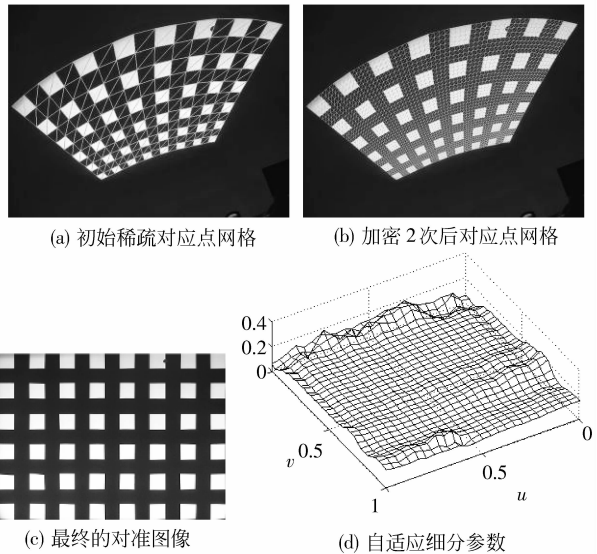


图 10 近似椭圆球面区域投影图像对准效果图

Fig. 10 Results of aligned camera images on approximate elliptic sphere region

曲面逼近椭圆曲面,并涂抹了许多灰浆而达到光滑性。从参数矩阵的变化情况看(图 10(d)和图 11(d)),其涂抹的灰浆具有较大起伏,并在柱面和椭圆面过渡区域更加明显。

为定量分析本方提出的图像对准方法的精度,以恢复的二值化“投影对准图像” I' 与原投影仪帧缓存图像 I 间的差异像素比例作为对准精度的衡量标准,并与文献[8]提出的分段线性纹理贴图对准方法进行比较,其结果如表 1 所示。

表 1 图像对准精度比较结果(图像间差异像素比例)

Tab. 1 Precision comparison results with other method

投影区域	方法		
	文献[8]	文献[11]	本文
近似柱面区域误差/%	1.96	1.73	1.20
混合曲面区域误差/%	5.69	4.43	2.51
近似椭圆球面区域误差/%	6.71	4.96	3.22
耗时/ms	1.07	16.88	857.81

其中计算误差为

$$e = \frac{\sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N |I(i,j) - I'(i,j)|}{\sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N I(i,j)} \quad (10)$$

从表 1 中可以看出,本文提出的图像对准方法精度要高于文献[8,11]的方法,并随着投影屏幕弯曲程度变大而效果更加明显。由于相机在拍摄投影图像时存在一定程度的色彩变换,所以需要“投影对准图像”事先经过二值化处理后,才能与投影仪帧缓存图像进行比较。其二值化处理会引入一定程度的误差,所以本文方法的实际对准精度都会略高于表 1 的数据。另外,由于图像对准步骤仅在进行几何校正和色彩校正步骤前离线的进行一次,故本文方法牺牲计算效率以避免密集采样带来的大量人工耗时,在实际工程中更具优势。

在精确的投影仪图像与相机图像对准的基础上,多投影仪显示墙的几何校正可在相机视场中进

行,利用激光经纬仪指定投影区域^[11];而多投影机显示墙的色彩校正可直接利用现有针对平面投影屏幕的色彩校正方案进行^[1]。图12给出了本文算法在实际工程中的一个应用实例,24个投影机联合显示出一幅机场视景,其投影区域覆盖屏幕的所有柱面、椭球面和混合曲面区域。



图12 本文实验环境及本文方法的实际应用实例

Fig.12 Experimental environment and a real application instance based on our method

4 结 论

针对多投影机显示墙系统画面校正问题,提出了一种无显式的需求任何投影机和相机以及屏幕曲面参数的图像对准算法,作为多投影机显示墙系统画面几何和色彩校正计算的基础。该方法基于一种简洁、稳定、自适应的细分网格加密算法,将投影机图像与相机图像间初始稀疏对应点网格加密到任意精度,从而建立两图像间像素级的对准关系,以便利用相机视场作为调整投影机画面的依据。在各种投影屏幕上的测试表明,本文提出的图像对准技术可适应任意光滑投影屏幕,从具有较广的应用范围。

实际的测试数据分析显示,本文提出的自适应细分网格加密算法的细分参数矩阵与屏幕曲面特性具有内在联系,但并不是直接与曲面的曲率相关。

细分参数矩阵与曲面特性内在联系的进一步分析,是我们下一步的研究重点。

参考文献 (References)

- [1] Brown M, Majumder A, Yang R. Camera-based calibration techniques for seamless multi-projector displays [J]. IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics, 2005, 11(2):193-206.
- [2] Raj A, Gill G, Majumder A, et al. PixelFlex2: a comprehensive, automatic, casually-aligned multi-projector display [C]// Proceeding IEEE International Workshop Projector-Camera System. Washington DC, USA: IEEE Computer Society, 2003: 1-8.
- [3] Ramesh R, van Jeroen B, Paul B. iLamps: geometrically aware and self-configuring projectors[C] // SIGGRAPH Proceedings. New York, USA: ACM Press,2003, 809-818.
- [4] Wallace G, Chen H, Li K. Automatic alignment of tiled displays for a desktop environment [J]. Journal of Software, 2004, 15(12): 1776-1786. [Wallace G, Chen H, Li K. 桌面环境下拼贴显示的自动对准[J]. 软件学报, 2004, 15(12): 1776-1786.]
- [5] Xiuhui W, Wei H, Hai L, et al. Screen calibration techniques for multi-projector tiled display wall[J]. Journal of Software, 2007, 18(11):2955-2964. [王修晖,华炜,林海,等. 面向多投影显示墙的画面校正技术[J]. 软件学报, 2007, 18(11):2955-2964.]
- [6] Ramesh R, van Jeroen B, Thomas W. Quadric transfer for immersive curved display [C] // Proceedings of EUROGRAPHICS. Washington DC, USA: IEEE Computer Society, 2004, 23(3): 451-460.
- [7] Philippe T J, Sebastien R, Martin T. Multi-projectors for Arbitrary Surfaces without Explicit Calibration nor Reconstruction [C]//Fourth International Conference on 3D Digital Imaging and Modeling. Washington DC, USA: IEEE Computer Society, 2003: 217-224.
- [8] Harville M, Culbertson B, Sobel I, et al. Practical methods for geometric and photometric correction of tiled projector displays on curved Surfaces[C] // Proceedings of the 2006 Conference on Computer Vision and Pattern Recognition Workshop. Washington DC, USA: IEEE Computer Society, 2006: 51-58.
- [9] Bhasker E, Juang R, Majumder A. Registration techniques for using imperfect and partially calibrated devices in planar multi-projector displays [J]. IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics, 2007, 13(6): 1352-1359.
- [10] Bimber O, Iwai D, Wetzstein G, et al. The visual computing of projector-camera systems[J]. Computer Graphics Forum,2008, 27(8): 2219-2245.
- [11] Zhang J, Wang B, Li X. Geometric Calibration of Projector Imagery on Curved Screen Based-on Subdivision Mesh [C]// Proceedings of Geometric Modeling and Processing. New York, USA: Springer, 2008: 592-600.
- [12] Nocedal J, Wright S J. Numerical Optimization[M]. New York, USA: Springer, 2000: 245-269.