

中图法分类号: TP751.1 文献标志码: A 文章编号: 1006-8961(2011)03-0342-08

论文索引信息: 刘一然, 杨旭波. 基于相机的多投影光度补偿系统 [J]. 中国图象图形学报, 2011, 16(3): 342-349

基于相机的多投影光度补偿系统

刘一然¹⁾, 杨旭波^{2),3)}

¹⁾(上海交通大学计算机科学与工程系, 上海 200240) ²⁾(智能计算与智能系统教育部-微软重点实验室, 上海 200240)

³⁾(上海交通大学软件学院, 上海 200240)

摘要: 现有关于光度补偿的研究主要基于单投影, 可在带有纹理和颜色的表面上进行投影显示。而在多投影系统中, 由于多投影带来了重叠区域的光度不一致性, 相机的每个像素覆盖的区域增大等问题, 容易致使光度补偿失败。介绍一种基于相机的多投影光度补偿系统, 虽然也是通过获取环境参数的手段, 但提出一种方便快捷的迭代方式来提高投影表面反射率参数的获取精度, 可以达到更好的效果, 并仅需对投影区域捕捉两幅以上图像。同时, 对多投影仪重叠区域的融合效果也做了改进, 统一解决了光度补偿和投影拼接问题。最后, 提供的实验结果表明有较好的改进效果。

关键词: 迭代补偿; 光度补偿; 光度融合; 多投影系统

Camera-based multi-projector radiometric compensation system

Liu Yiran¹⁾, Yang Xubo^{2),3)}

¹⁾(Department of Computer Science and Engineering, Master, Jiaotong University, Shanghai 200240 China)

²⁾(MOE-Microsoft Laboratory for Intelligent Computing and Intelligent Systems, Shanghai 200240 China)

³⁾(School of Software, Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200240 China)

Abstract: Single projector radiometric compensation technique has made it possible for a projector to display on ordinary surface with colors and textures. However, when applying these methods to multi-projectors, many issues will happen, including the inconsistency in intensity of the overlapping areas, region expansion of a single pixel, all of which will lead to failure of the compensation. This paper presents a multi-projector and camera system with the ability of geometry correction, radiometric compensation and photometric consistency and solves the problems as mentioned. We use a convenient and iterative way to obtain more precise parameter of the reflection property for the projecting surface. This only considers two or more pictures of the projecting-surface, so that it can provide much better compensation results. We also improve the blending effects of the overlapped areas of multi-projectors and thus provide a unified solution for radiometric compensation and photometric inconsistency when displaying on non-optimized surfaces with multi-projectors. Experiments indicate the improvements of the new method compared to the original algorithm.

Keywords: iterative compensation; intensity blending; radiometric compensation; multi-projector system

0 引言

在普通的投影应用中, 高质量的、平整的白色屏

幕是必不可少的。近年来, 投影技术在不断发展更新。Nayar 等人^[1]首次提出了如何针对有纹理的表面和动态的环境纹理以及不同空间位置的反射率进行补偿, 提出了基于投影仪相机的光度补偿系统, 使

收稿日期: 2009-09-24; 修回日期: 2009-11-05

基金项目: 国家高技术研究发展计划(863)项目(2006AA01Z307)。

第一作者简介: 刘一然(1983—), 男, 上海交通大学计算机应用专业硕士研究生, 主要研究方向计算机图形学。

E-mail: lyronly@gmail.com。

通讯作者: 杨旭波, E-mail: yangxubo@cs.sjtu.edu.cn。

得投影仪能够在非理想的具有颜色、纹理和不同反射率的表面成像。研究者们提出的相机响应函数空间的模型^[1]和通过捕捉一系列已知的不同曝光度的图像来得到相机响应函数的高度动态图像的方法^[2]为方便使用相机投影仪系统打下了基础。

而在针对白色平面的多投影拼接系统中,多投影几何与光度不一致以及重叠区域过亮是基本问题。Raskar 等人^[3]提出了光度衰减的算法,这种方法令每个处于重叠区域的像素乘以一个系数,各个区域的重叠像素系数之和为 1,计算量较小。

针对白色非平面的几何校正问题,目前的主要方法是由每个投影仪来投影多个特征点而得到,例如 Raskar 等人^[4]使用相机来几何校准多投影系统,每个投影仪投影一个棋盘格模式图,相机捕捉并查找角点,计算投影仪-摄像机单应性矩阵,从而求得所需的投影仪-参考图像单应性矩阵,多投影可以对表面几何进行适应性调整,投影表面不再必须是平面。

然而,在现有研究中,在带有纹理和颜色背景上的光度补偿技术通常仅针对单投影,而多投影系统的拼接融合研究则主要考虑在白色理想表面投影时的光度一致性问题。这两个问题是孤立研究的,如何把这两个问题结合起来,同时加以解决;把光度补偿技术融于多投影系统之中,使其能够支持带有纹理与颜色的非规则复杂表面,这是本文的研究重点。

现阶段国内外关于这方面的研究比较少,尚有不少问题需要解决,光度补偿和光度一致性的综合解决、多投影系统的架构都变得复杂。一方面,在多投影时,如果使用与单投影一样的补偿方法,用相机拍摄整个投影区域,由于每个像素点覆盖的区域增大,相机解析度变相降低,导致补偿的效果不理想。另一方面,在有纹理的表面上的多投影重叠区域,若直接采用传统衰减方法,则可能使得重叠区域的亮度过暗。为此要设计出更有效的新方法。

提出一种基于迭代思想的多投影的光度补偿方法,统一解决了在复杂表面上的光度补偿和投影拼接问题,相比直接使用单投影的光度补偿方法,效果明显改进,并可将其用于动态环境光的补偿。

1 系统流程以及框架

本文方法的主要流程由几何校正、光度补偿、边缘融合 3 个步骤组成,如图 1 所示。其中,离线处理步骤主要获取采样照片(每个投影仪各一张棋盘格图像和一张灰度图像,以及若干张补偿后的图像),只要投影仪和投影屏幕的相对位置不变,就不需要再重新实验。步骤 1 处理采样数据,每次启动程序都会执行一次,执行后程序进入步骤 2—6 的循环。步骤 2 主要是从视频流或显存中截取要显示的图像,将其交给下一阶段处理。步骤 3 进行几何校正,

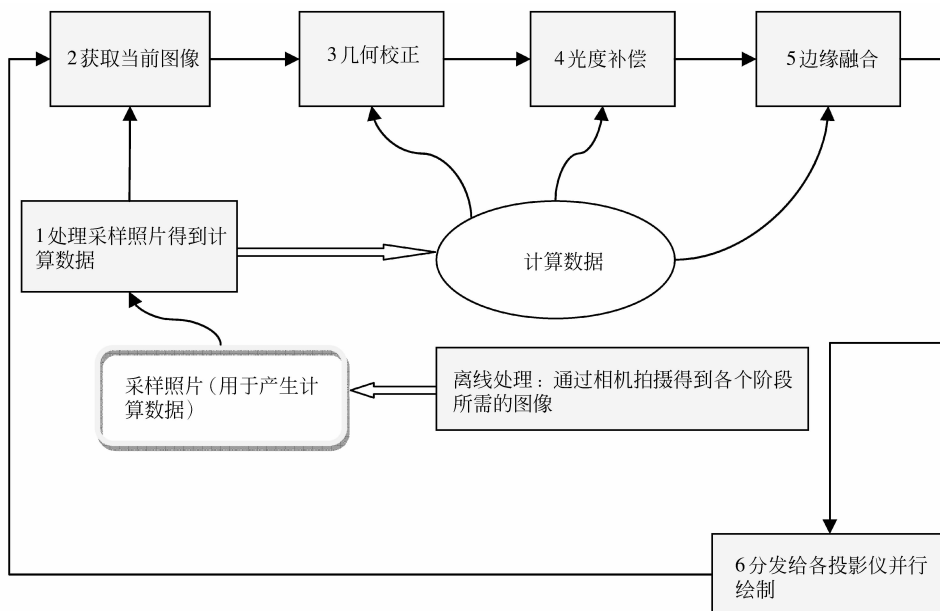


图 1 系统流程图(空心箭头:表示写数据;曲线:表示读数据;直线箭头:表示程序的流程)

Fig. 1 System flow chat (hollow arrow: writing data; curve arrow: reading data; straight line arrow: program flow)

使得从相机角度观察的结果是个矩形,而且能够使投影在曲面上的图像在相机的角度没有扭曲和拉伸,如同投影在普通平面上。步骤 4 为光度补偿,使得投影在有纹理的表面的投影能补偿掉颜色与纹理的影响,使之如同投影在白色表面上。步骤 5 为边缘融合,通过对重叠区域的像素进行衰减处理来解决重叠区域图像过亮的情形(如图 2)。经过步骤 5 之后就可以产生对应于各个投影仪的最终显示图像。以上步骤 1—5 都在同一台主机上运行,步骤 6 主要是通过网络把图像发送到连接投影仪的各台主机。

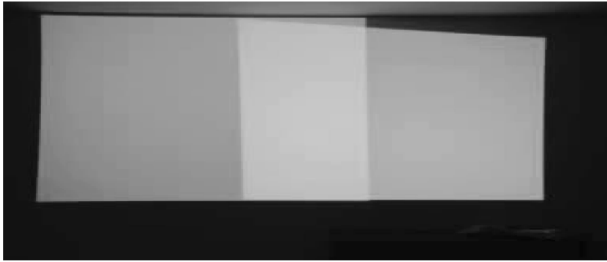


图 2 重叠区域过亮

Fig. 2 The overlapped area is brighter than other area

其中,将光度补偿置于边缘融合之前的理由是:首先,由于本文边缘融合采用局部边缘衰减的算法,所以无论光度补偿和边缘融合次序如何,处于非重叠区域的像素都不会受到影响,所以只需要考虑重叠区域像素的情况。其次,边缘衰减(边缘融合)的作用是去除重叠区域过亮的影响,对投影屏幕上某一点来说,就是通过减小该点在各台投影仪图像中对应的像素值来使该点最终的投影效果接近于只用一台投影仪投影的效果。对于重叠区域的像素来说,虽然经过了各个投影仪的多次光度补偿,但是由于使用同样的算法,可以认为,对各台投影仪覆盖到屏幕上的同一点,该点在各台投影仪图像中对应的像素值是相等的。因此,边缘融合放在光度补偿之后就可以让屏幕上重叠区域的视觉效果接近于只补偿一次的效果(这样做还有一个好处,就是在光度补偿阶段不用考虑边缘融合的问题)。反之,如果把光度补偿放在边缘融合之后,重叠区域的像素在边缘衰减后会被多次补偿(取决于该像素点被几台投影仪的投影区域覆盖,如在图 3 中,点 X 被补偿了两次),而这种“过度补偿”的效果无法由边缘融合来弥补,最后的结果就不会正确。

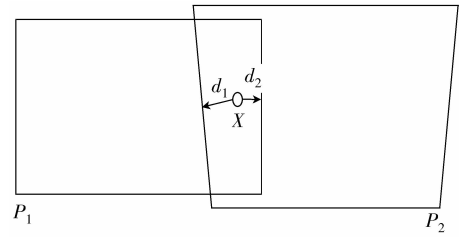


图 3 点 X 到投影 P_1, P_2 区域边的归一化最短距离的 d_1, d_2

Fig. 3 Distance d_1 and d_2 the shortest normalized distance of point X to the edge of the region P_1, P_2

2 几何校正

本文使用的相机和投影仪是独立的且非共轴的,若相对位置发生改变,则需要重新标定,建立相机和投影仪点之间的单应性映射。在前期研究中,我们提出了一种针对带有纹理和非规则几何的复杂表面的鲁棒棋盘格检测方法^[5],在相机捕捉到的图像中找到棋盘格上的角点,得到在相机图像中的坐标。对属于同一个黑格或白格上的 4 个点,我们使用多项式拟合来计算相机和投影仪之间的点点映射矩阵,并把这个变换矩阵用于该黑格或白格上的其他点。

获得投影仪和相机图像的对应关系后就可以进行几何校正。首先把图像映射到相机空间,相当于设计好相机视角看到图像的效果。再根据相机到投影仪的点点映射为每个投影仪产生它们各自要显示的图像部分。这时的图像已经具有几何校正的效果。图像分割好后,接下来的处理都是针对分配给单个投影仪的投影图像来进行的。

3 光度补偿

3.1 光度补偿模型

本文重点关注的是光度补偿方法,同时我们假设对投影仪和相机的响应函数都是线性的。通过事先的测算,分别得到红绿蓝 3 个颜色通道的响应函数。本文使用的光度模型与文献[1,6-7]中提到的类似。光度补偿模型可以简单地表示为

$$C = A(VP + F) \quad (1)$$

$$\mathbf{C} = \begin{bmatrix} C_R \\ C_G \\ C_B \end{bmatrix}, \mathbf{P} = \begin{bmatrix} P_R \\ P_G \\ P_B \end{bmatrix}, \mathbf{F} = \begin{bmatrix} F_R \\ F_G \\ F_B \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} A_R & 0 & 0 \\ 0 & A_G & 0 \\ 0 & 0 & A_B \end{bmatrix}, \mathbf{V} = \begin{bmatrix} V_{RR} & V_{GR} & V_{BR} \\ V_{RG} & V_{GG} & V_{BG} \\ V_{RB} & V_{GB} & V_{BB} \end{bmatrix}$$

式中, $\mathbf{C}, \mathbf{P}, \mathbf{F}$ 均以 RGB 3 维向量表示; 向量 \mathbf{C} 代表相机捕捉到的颜色信息; 向量 \mathbf{P} 代表投影仪在各颜色通道上的亮度; 向量 \mathbf{F} 代表环境光。

此外, 矩阵 \mathbf{A} 代表投影表面的材质反射系数; 矩阵 \mathbf{V} 代表颜色混合矩阵 (color mixing matrix), 是一个 3×3 矩阵。它表征的是某个像素点红绿蓝 3 个通道相互干扰的程度, 如 V_{BR} 代表投影仪的蓝色通道对相机红色通道的影响程度。

对式(1)可作变形得到

$$\mathbf{C} = \mathbf{A}(\mathbf{V}\mathbf{P} + \mathbf{F}) = \mathbf{A}\mathbf{V}\mathbf{P} + \mathbf{A}\mathbf{F} \quad (2)$$

理论上, 对每个点都需要测 $\mathbf{A}, \mathbf{F}, \mathbf{V}$ 3 个参数。然而, 在前期研究中我们发现, 投影仪相机系统的颜色混合矩阵独立于投影表面属性和环境光^[8]。因此对于一个投影仪相机系统, 使用一个颜色混合矩阵已经足够, 不需要对不同的像素点使用和存储不同的颜色混合矩阵, 这样每个像素点只需要 \mathbf{A}, \mathbf{F} 两个参数。而本实验假设 \mathbf{A} 是不变的, 所以 \mathbf{A} 只需要在实验前测一次。在静态环境光条件下, \mathbf{F} 也只需要在实验前测一次, 而对于环境光变化的场景, 则需要实时测量 \mathbf{F} 。

3.2 投影仪相机系统颜色混合矩阵的测定

在所有属性中 \mathbf{V} 被当做投影仪相机系统的固有属性, 只需要测量一次就可以进行多次实验。但由于 \mathbf{A} 不可能先于 \mathbf{V} 测量, 所以无法获得完全正确的颜色混合矩阵参数。我们可以做的是, 选择一个参考点, 测得该点的 $\mathbf{A} \times \mathbf{V}$ 值, 将该值作为系统颜色混合矩阵的值, 而其他点的颜色混合矩阵则可设置为将系统颜色混合矩阵的每一行乘上不同系数, 其中行元素之间的比例是一致的^[8]。假设 P 是参考点, 系统颜色混合矩阵的值为 $\mathbf{A}_0 \times \mathbf{V}_0$, 将该值用于其他任何一点 P' , \mathbf{A}' 表示与 P' 对应的真实反射系数, \mathbf{V}' 表示 P' 的真实颜色混合矩阵。

当我们用 $\mathbf{V}^* = \mathbf{A}_0 \times \mathbf{V}_0$ 代替 \mathbf{V}' 时, \mathbf{V}^* 等于

$$\begin{bmatrix} V_{RR}^* & V_{GR}^* & V_{BR}^* \\ V_{RG}^* & V_{GG}^* & V_{BG}^* \\ V_{RB}^* & V_{GB}^* & V_{BB}^* \end{bmatrix}$$

也等于

$$\begin{bmatrix} A_R V_{RR} & A_R V_{GR} & A_R V_{BR} \\ A_G V_{RG} & A_G V_{GG} & A_G V_{BG} \\ A_B V_{RB} & A_B V_{GB} & A_B V_{BB} \end{bmatrix}$$

这样得到

$$\mathbf{A}' \times \mathbf{V}' = \mathbf{A}^* \times (\mathbf{A}_0 \times \mathbf{V}_0) \quad (3)$$

由于 \mathbf{A}^* 和 \mathbf{A}' 都是对角矩阵, 当我们用 \mathbf{A}^* 来代替 \mathbf{A}' 时, 就把用 $\mathbf{A}_0 \times \mathbf{V}_0$ 代替 \mathbf{V}' 的误差抵消了。所以只要满足 \mathbf{A}^* 和 \mathbf{V}^* 的乘积不变, \mathbf{A}^* 和 \mathbf{V}^* 就可以任意变化。为简便起见, 以下的 \mathbf{A}, \mathbf{A}^* 是同一个意思, \mathbf{V}, \mathbf{V}^* 是同一个意思。为了测量 \mathbf{A}^* 和 \mathbf{V}^* 的值, 需要投影一幅黑色图像, 投影单色图像红、白、蓝各一幅。

投影一幅黑色 (0,0,0) 值图像是为了得到环境光和反射矩阵的乘积, 即

$$\mathbf{C}^{(0)} = \mathbf{A}^* \left(\mathbf{V}^* \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} + \mathbf{F} \right) \quad (4)$$

投影单色图像是为了得到 \mathbf{V} 第 1 列, 即

$$\mathbf{C}^{(1)} = \mathbf{A}^* \left(\mathbf{V}^* \begin{bmatrix} P_R \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} + \mathbf{F} \right) \quad (5)$$

令 $\Delta\mathbf{C} = \mathbf{C}^{(1)} - \mathbf{C}^{(0)}$ 。 $\Delta\mathbf{C}_R$ 为 $\Delta\mathbf{C}$ 第一个元素, $\Delta\mathbf{C}_G$ 为第 2 个, $\Delta\mathbf{C}_B$ 为第 3 个。 \mathbf{V}^* 的第 1 列元素计算如下, 其余两列同样处理, 得到式(6), 即

$$A_R^* V_{RR}^* = \frac{\Delta\mathbf{C}_R}{P_R}, A_R^* V_{RG}^* = \frac{\Delta\mathbf{C}_G}{P_R}, A_R^* V_{RB}^* = \frac{\Delta\mathbf{C}_B}{P_R} \quad (6)$$

3.3 投影屏幕反射系数的确定

考虑到投影仪投出的不同角度光线与屏幕的夹角不同, 会造成光的漫反射程度不同, 为投影仪建立一张对应每个像素的反射率表是必要的。

在得到颜色混合矩阵后, 就可以测量每个点的反射率。我们用 \mathbf{V}^* 作为系统颜色混合矩阵, 与测量 \mathbf{V}^* 的方法类似, 不同的是由于系统颜色混合矩阵已知, 我们可以只投影一幅黑色 (0,0,0) 图像和另一幅已知颜色值的图像 (P_R, P_G, P_B) 就够了。同样把相机捕捉到的图像分别记为 $\mathbf{C}^{(0)}, \mathbf{C}^{(1)}$ 。令 $\Delta\mathbf{C} = \mathbf{C}^{(1)} - \mathbf{C}^{(0)}$, 则得到

$$\begin{bmatrix} \Delta\mathbf{C}_R \\ \Delta\mathbf{C}_G \\ \Delta\mathbf{C}_B \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_R^* & 0 & 0 \\ 0 & A_G^* & 0 \\ 0 & 0 & A_B^* \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} V_{RR}^* & V_{GR}^* & V_{BR}^* \\ V_{RG}^* & V_{GG}^* & V_{BG}^* \\ V_{RB}^* & V_{GB}^* & V_{BB}^* \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} P_R \\ P_G \\ P_B \end{bmatrix} \quad (7)$$

由式(7)可以得到

$$\begin{aligned} A_R^* &= \frac{\Delta C_R}{V_{RR}^* P_R + V_{GR}^* P_G + V_{BR}^* P_B} \\ A_G^* &= \frac{\Delta C_G}{V_{RG}^* P_R + V_{GG}^* P_G + V_{BG}^* P_B} \\ A_B^* &= \frac{\Delta C_B}{V_{RB}^* P_R + V_{GB}^* P_G + V_{BB}^* P_B} \end{aligned} \quad (8)$$

这样 A 对应 3 个颜色通道的反射系数就可求出。

3.4 理想图像的生成及环境光信息的获取

对于动态环境光的情况,假设我们有一幅已知的理想环境光 F 下的捕捉图像(对应像素为 C),时间 t 对应的环境光为 F_t ,捕捉到图像 C_t ,

$$\begin{aligned} C &= A^* V^* P + A^* F \\ C_t &= A^* V^* P + A^* F_t \end{aligned} \quad (9)$$

对以上图像求差,可得到环境光与反射系数的乘积

$$A^* F_t = \Delta C + A^* F \quad (10)$$

而对于静态环境光,我们只需投影一幅黑色(0,0,0)图像,得到的 $C^{(0)}$,即为 $A^* V^*$ 。

3.5 通过迭代补偿来修正参数

上面参数都测定后,可以计算得出应该投影的像素值:

$$P = V^{*-1} A^{*-1} (C_t - A^* F_t) \quad (11)$$

之前的方法只是通过投影一次灰度图像来获得参数 A^* , V^* 和 F , 在应用到多个投影仪时效果不够理想。我们通过一种简单的方法来提高参数的精度,即通过迭代地捕捉补偿过的图像来进一步修正参数。这里,假设参数 A^* 是需要修正的,而 V^* , F 是准确的。对应 C_R^t, C_R 则是想要该点显示的理想值。反射系数应作如下修正(如下以红色通道为例):

$$A_R^{*t} = \frac{C_R^t}{C_R} \cdot A_R^{*(t-1)} \quad (12)$$

即对每个像素反射系数,对应的修正系数为该像素在相机中对应点的像素值除以该点像素理想值。值得指出的是,这里的 C_R^t 是已经经过第 $t-1$ 次补偿后相机得到的结果。 $A_R^{*(t-1)}$ 为第 $t-1$ 次得到反射系数。

具体实验时,对补偿后的图像分别捕捉 n 次,用于修正反射系数,最后一次捕捉的补偿图像对应于我们想要该点显示的理想值。每捕捉一次都要重新运行一次程序来调整反射系数,一般实验到效果满

意为止。 n 大小一般为 3~5。

3.6 GPU 加速

光度补偿这一部分的计算量比较大,实际上所有的计算都在一台主机上进行,计算完成后再传到负责显示的客户端。我们使用的显卡是 GeForce 8800GT。GPU 加速的主要任务是把原先的代码移植到 CUDA 上。移植的大部分代码都是处理内存和显存之间的数据拷贝,由于精度的限制,最终的显示图像色彩有所失真。

实验以 4 台投影仪,每台解析度为 800×600 为例,在忽略网络传输速度的影响下,如果不使用 GPU 加速,则显示速度是在 7 帧/s 以下,使用 GPU 加速速度后达到 16 帧/s,可满足播放视频和交互的需要。

4 边缘融合

在投影仪投影区域重叠的地方,亮度会明显比其他地方高。解决这一问题的方法是:对每个投影仪,给重叠区域像素点的值乘以一个小于 1 的权值系数,且所有投影仪对应于该点的权值系数之和为 1。

可以看到文献[2]中提出,对投影仪 j 上的某像素点 P_j ,其权值系数为

$$B_{p_j}(x_{p_j}, y_{p_j}) = \frac{d_{p_j}(x_{p_j}, y_{p_j})}{\sum_{k=1}^N d_{p_k}(H_{c2p_k} \cdot H_{p2c_j}(x_{p_j}, y_{p_j}))} \quad (13)$$

式中, N 为投影仪的个数,分子 d 是像素点 P_j 的对应点 X 到每个投影仪投影区域 4 个边的归一化最短距离,如图 4 所示。 H 是几何校正过程用于计算点点映射的单应性矩阵(homography)。分母为该像素点对应于所有投影仪的 d 之和。

在实验中,我们发现,直接采用式(13),重叠区域反而会变得比较暗,无论是对两个投影仪还是 4 个都是如此。这是由于对于同一像素,不同投影仪的亮度不同造成的。由于 $\sum_i B_{p_i}(x_{p_i}, y_{p_i}) = 1$ 为了使重叠区域变亮,必须要使得 $\sum_i B_{p_i}(x_{p_i}, y_{p_i}) > 1$ 。使用 $B_{p_i}(x_{p_i}, y_{p_i})$ 的 α 次幂($0 < \alpha < 1$),这时权值系数之和为 1 的条件不再满足。 $\alpha = 1$ 时为文献[2]中的效果。 α 越大则重叠区域越暗,越小则越亮。经过多次实验,发现 α 取 0.33 时效果比较好。

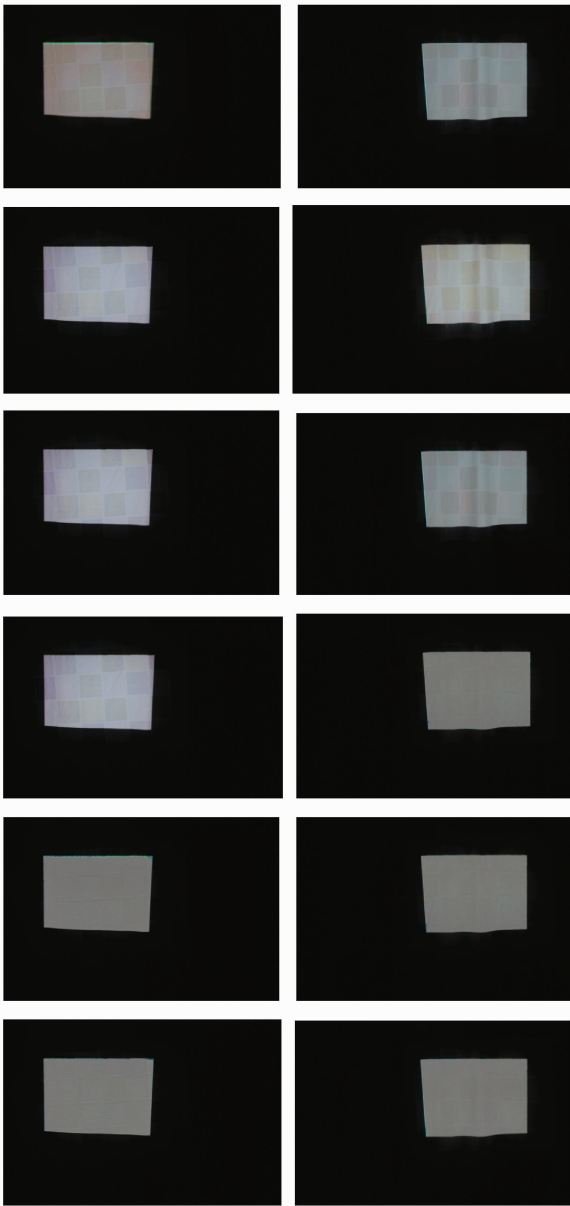


图 4 两个投影仪的迭代结果:第 1—6 行表示从第 0~5 次迭代($t=0,1,2,3,4,5$)的左右两个投影仪的补偿结果

Fig.4 The iteration result of two projectors; Row 1—6: the compensation results with iterations number $t = 0, 1, 2, 3, 4, 5$

5 实验效果

在本实验中我们使用了两台投影仪和一个单反相机。实验之前首先要数据采样:对每个投影仪都需要棋盘格一张,灰度(180,180,180)图一张,(0,0,0)图像一张,补偿后的图像 n 张,其中, n 值在实际拍摄时决定,一般可定为 3~5 的整数。

投影的棋盘格用于计算点点映射,即得到每台投影仪图像空间的每个像素点与相机图像空间的对应像素点的关系。一个相机空间的像素点可能与多个投影仪的点映射,这样的点就处在投影的重叠区域中。

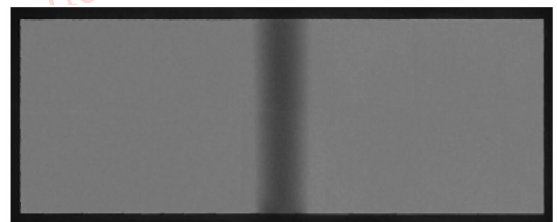
每个投影仪都投影像素值为(0,0,0)的图像一张,用于计算环境光。每个投影仪都投影灰度图一张,用于计算反射系数,详见第 3 节。

5.1 迭代补偿实验效果

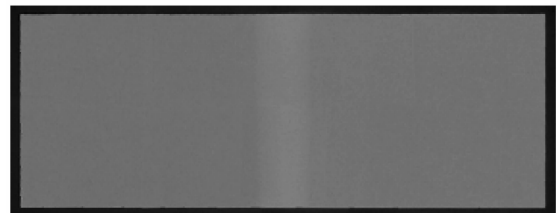
图 4 是两个投影仪一台相机 5 次补偿的每一次结果。第 1 行的两幅是没有迭代的左右两个投影仪的效果,是采用之前的方法得到的,可以看到有明显的方格状背景。而通过 4—5 次迭代,方格状背景几乎看不到了。由于左右两边投影仪亮度以及其他参数的差别(虽然两台投影仪是同一型号)以及相机与投影屏幕夹角不同的关系,对同一 t 左右两边图像的补偿效果并不一致,亮度高的投影仪往往效果比较好。随着迭代次数的增加,图像背景的模式越来越不明显,说明补偿的效果越来越好。 t 越大,一般而言补偿效果越好。第 4 次与第 5 次迭代结果区别不大,说明迭代补偿到了一定次数之后,效果趋于稳定。同时 t 越大,图像周围出现色斑的概率也会增大,这是由于误差累计产生的。考虑到这些因素,一般实验时 t 取为 3~4。

5.2 边缘融合实验效果

边缘融合效果如图 5 所示。通过图 5(a)可以



(a) 直接使用式(13)的结果



(b) 本文改进后的结果

图 5 边缘融合结果对比

Fig.5 Comparison of edge blending results

看出(注意图像中间的重叠区域,有明显的阴影区域,阴影区域即为重叠区域),直接使用式(13),重叠区域明显过暗,说明式(13)有点矫枉过正。由图 5(b)可见,我们改进后的效果好多了,但由于使用了纯灰度图片,重叠区域与其他区域的不一致还是比较明显,如果使用普通图片效果会好些,参见图 7 的效果。

5.3 整合后实验效果

采用图 6 的复杂投影表面,最终的显示效果如图 7。



图 6 复杂投影表面(不平整且有纹理)

Fig. 6 Complex projecting surface with color texture and non-flat

以上这些测量和计算都是在预处理阶段完成,只要多投影相机系统的物理配置环境不发生变化,就可以直接利用所测得的数据对后续的投影图像进行补偿。本系统的主要特点是基于迭代方法自动测

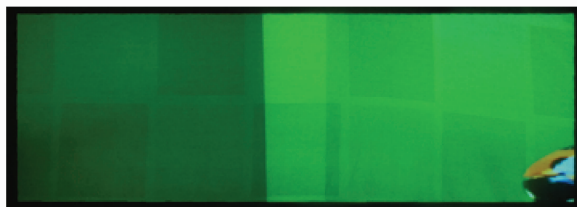
量参数,并将几何校正、光度补偿和光度一致性问题统一到一个框架下加以解决,方便有效地支持多个投影仪在带有纹理和颜色的非平面背景上进行投影显示。

观察图 7(a)图,此时只进行了几何校正,可以看到两台投影仪的投影图像被拼接成了规则的矩形,但是中间有过亮的条纹,窗帘背景的格子图案也很明显。观察图 7(b)图,此时进行几何校正、光度补偿和边缘融合,可以看出,光度补偿使得背景格子图案不再容易觉察,边缘融合使得中间区域的亮度与周围融为一体,整幅图像的还原度有了明显提高。

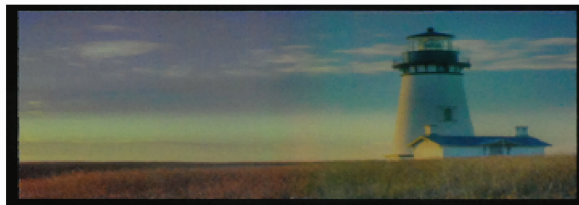
本文方法可方便地支持更多投影仪,在实验中,通过 GPU 加速,我们采用 4 台投影仪在图 6 的复杂背景上拼接和光度补偿后,可到达播放视频的速度。

6 结 论

提出一种基于相机投影仪架构的多投影系统,结合了几何校正、光度补偿和光度一致 3 大功能,不需要手动调试参数,只需要拍摄一定数量的照片就可以自动从相片中获取参数。在光度补偿方面,改进了单投影的补偿方法,提出了迭代补偿的方法。在光度一致性方面,融合的效果更为自然。未来的研究将集中于怎样缩短数据采集中人工干预的部分,减少整个采集过程的时间,以及怎样使得光度补偿的效果更好,色斑更少。



(a) 只进行几何校正的图像



(b) 进行几何校正、光度补偿和边缘融合的图像

图 7 2 组对比图像

Fig. 7 Contrast images

参考文献 (References)

- [1] Shree K Nayar, Harish Peri, Michael D Grossberg, et al. A projection system with radiometric compensation for screen imperfections[EB/OL]. 2003, [2010- 12- 06]. http://www.procams.org/procams2003/papers/nayar_peri_grossberg_bellumeur.pdf.
- [2] Paul E Debevec, Jitendra Malik. Recovering high dynamic range radiance maps from photographs [EB/OL]. 1997, [2010- 12- 06]. <http://portal.acm.org/citation.cfm?id=25888497>.
- [3] Ramesh Raskar, Jeroen van Baar, Jin Xiangchai. Low-cost projector Mosaic with fast registration [C]//Proceedings of Asian Conference on Computer Vision. Melbourne, Australia IEEE, 2002:161-168.
- [4] Ramesh Raskar, Jeroen van Baar, Paul Beardsley, et al. iLamps: Geometrically aware and self-configuring projectors [J]//ACM Transactions on Graphics, 2003, 22(3) : 809-818.
- [5] Sun Weibin, Yang Xubo, Xiao Shuangjiu, et al. Robust checkerboard recognition for efficient nonplanar geometry registration in projector-camera systems[EB/OL]. 2008, [2010- 12- 06]. <http://portal.acm.org/citation.cfm?id=1394625>.
- [6] Michael D Grossberg, Harish Peri, Shree K Nayar, et al. Making one object look like another: controlling appearance Using a projector-camera system [C]//Proceedings of the 2004 IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. Wangshitong, DC: IEEE Press, 2004, 1: 452-459.
- [7] Kensaku Fujii, Michael D Grossberg, Shree K Nayar. A projector-camera system with real-time photometric adaptation for dynamic environments [C]//Proceedings of the 2005 IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, Sandiego, CA: IEEE Press, 2005, 1: 814-821.
- [8] Chen Xinli, Yang Xubo, Xiao Shuangjiu, et al. Color mixing property of a projector-camera system[EB/OL]. 2008 [2010- 12- 06]. <http://portal.acm.org/citation.cfm?id=1394641>.