

中图法分类号: O432.1 O435.1 TP391.41T 文献标志码: A 文章编号: 1006-8961(2010)11-1664-06

检索信息: 傅凌进, 徐海松, 邹文海. 一种投影仪相机系统几何配准的鲁棒算法[J]. 中国图象图形学报, 2010, 15(11): 1664-1669

一种投影仪相机系统几何配准的鲁棒算法

傅凌进, 徐海松, 邹文海

(浙江大学现代光学仪器国家重点实验室, 杭州 310027)

摘要: 目前投影屏的反射及几何特性决定了投影仪投影图像的显示效果。为解除投影仪对标准屏幕的依赖性, 借助数码相机可构成反馈系统对显示表面的缺陷进行辐射度补偿和图像校正, 而其前提即是建立投影图像面与相机图像面像素之间的配准关系。为实现这一目的提出了一种能实现投影仪相机系统几何配准方法的鲁棒算法。通过设计黑白二色编码图像、显示采集编码图像的方式并对捕获图像进行二值化以及形态学处理以定位和识别采样色块, 建立几何配准函数关系。该算法在平面、曲面以及无图案与有图案等各种显示表面的投影场景中得以验证, 其平均配准误差稳定在 0.2~1.0 个像素单位, 且不依赖于色块的数量而变化, 并能在 10 s 内完成整个配准关系的建立。实验表明该方法能在适用范围以及精度和效率等方面满足相机反馈式投影仪像面配准的应用需求。

关键词: 投影仪相机系统; 图像配准; 几何映射; 二值化

A robust registration algorithm of image geometry for projector-camera system

FU Lingjin, XU Haisong, ZOU Wenhai

(State Key Laboratory of Modern Optical Instrumentation, Zhejiang University, Hangzhou 310027)

Abstract: The existing projector relies on a high quality screen for exhibiting a remarkable image, which would be affected by the reflecting and geometric characteristics of the screen. Aiming to relax this confinement, the projector-camera system is then developed to compensate and correct, in radiometry, the shortcomings of the display quality on the screen, in which the geometric registration between the pixels of projection and camera images becomes a foundational and significant issue. Based on the methods of lump sampling, morphologic processing, identifying and locating the sampling patches, as well as binary polynomial fitting method, a registration algorithm was achieved. The established algorithm was tested under various scenes of different display surfaces, including both flat and curved screens, together with clean and colour-patterned screens. The experimental results indicated that the mean deviation of image registration was between 0.2 to 1.0 pixel units, regardless of the change in sampling quantity. Meanwhile, the executive time of the registration was less than 10 seconds. This sound efficiency and high precision implied this algorithm is applicable to practical demands.

Keywords: projector-camera system; image registration; geometric mapping; binarization

0 引言

近年来, 投影显示技术得到大幅发展, 并被广泛应用于教育、商务以及娱乐等不同领域。不同场合下的显示需求势必对投影仪的功能、特别是对各种

显示表面的适应性提出了更高的要求^[1-2]。传统投影仪的使用要求将图像投影到白色的专用投影屏上, 若屏幕带有斑纹或阴影, 观看效果将很不理想, 这种对高质量屏幕的依赖性在很大程度上限制了投影仪的应用范围^[3-5]。最近在投影显示研究领域出现的投影仪相机系统 (ProCams) 可用于解除或有效

收稿日期: 2009-02-06; 改回日期: 2009-07-02

第一作者简介: 傅凌进 (1984—), 男, 中国浙江大学与英国利兹大学色彩与图像科学方向的双学位联合培养硕士。主要研究方向为计算机视觉、图像处理、颜色科学、智能识别、影像设备、电子信息、光学传感等领域。E-mail: fulingjin@gmail.com。

降低对投影屏幕的限制,其构架如图 1 所示^[1]。投影仪(P)投出内容图像(I)到屏幕(S),在屏幕上显示的影像被相机(C)捕获,经采集设备(G)输入到计算机,由此对反馈信息进行智能处理和评估,以修正投出影像的显示效果。该系统结构简单,成本低,适应复杂安装需求,精度能控制在人眼辨别范围之内。

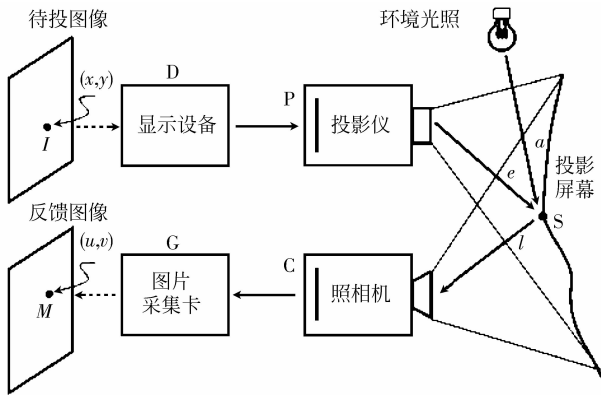


图 1 投影仪相机系统构架

Fig. 1 A sketch of projector-camera system

实现投影图像的自动校正须准确决定投影图像的补偿位置,故首先应建立投影图像(I)与相机图像(M)在像素之间的映射关系,即投影仪相机系统的图像配准。图形学上定义该过程为在 2 维甚至 3 维图像中寻找某种适当的空间变换,使两幅图像达到空间位置上的定位和映射。配准实现有多种途径^[2-4],如基于特征点、轮廓线、色彩度、灰度图、色块取样等。美国哥伦比亚大学 Grossberg 等人在文献[1,4-5]中提出用 1 024 个固定色块来获取相应映射样本值,再以二次多项式拟合得到整个图像的映射关系。由于图像传输上的系统噪声和随机噪声影响,直接获取色块的坐标非常困难,本文通过图像编码、图像二值化以及特定的图像处理技术高效实现了系统的图像配准,并在实验中讨论了编码色块数量及屏幕种类对几何配准精度的影响。

1 原理与方法

获得像素级的图像配准通过采样图像面上的关键点经拟合得到整个图像面上适用的 2 维图形变换函数来实现。关键点由较大尺寸的色块阵列来表示^[6],以便相机的捕获,样例如图 2 所示。

为建立相机捕获图像与投影图中色块坐标(关

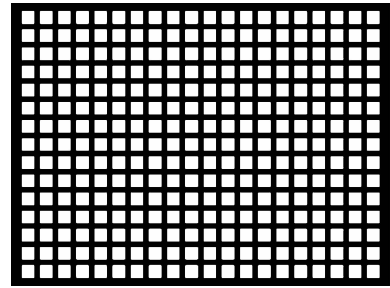


图 2 色块级采样图像样例(投影图)

Fig. 2 An example of lump-filled image for special sampling

键点)的映射关系,对色块进行编码能巧妙提高运算效率;再基于该系统的数字图像处理技术如二值化、形态学处理等,以消除周围环境的调制以及设备、场景引入的噪声,从而获取更精准的色块坐标。

1.1 投影图像的编码

如图 2 所示的采样色块须赋予不同的码符,以便在捕获图中予以识别,从而达到两者关键点之间的配准。色块编码方法众多^[3],常用的有颜色编码、渐变编码、形状编码等。本文采用黑白二色编码方法,可得到较高对比度的图案,且对不同颜色特性显示表面的适应性较好。

借助时域分割的思想,以一幅含有 4 个色块的投影图为例,可用如图 3 所示的 3 张图进行编码,其中图 3(a)所示含有所有色块的投影图称为色块全排列图。若以 1 标识亮、0 标识暗,则按某色块在 3 张图中对应位置的亮暗,第 1 至第 4 色块可分别编码为 100,101,110 和 111(对应位置分别为左上、右上、左下、右下)。

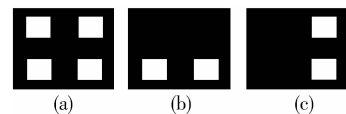


图 3 对 4 个色块的编码图例

Fig. 3 An illustration of image coding with four lumps

若取此编码的非首位字符集,则对应十进制恰为 0,1,2,3,以此作为其识别码。如果在捕获图像中发现一个色块亮暗变化符合某一规律,则该色块即可与原设计投影图像中的色块相对应,从而唯一确定所有 4 个色块坐标的对应关系。

1.2 捕获图像二值化

捕获图像 M 综合了色块本身、屏幕调制函数以及周围环境等方面的光照刺激,其中色块占据了图像中较亮的部分,通过二值化可将色块从背景中分

离出来以进一步找到其坐标。针对投影仪相机系统的特点,本文的二值化方法包括以下步骤。

1) 背景差分

在投影含有色块的图像之前,先投影一幅全黑图像,此时捕获到的图像包含暗屏幕信息以及周围环境影响因子。将色块图与背景分离,以增强图像对比度,且抵消了相机中心视场和边沿视场感光的差异,减少图像中心和边沿亮度的不均匀性。背景差分后的图像 $M'_{u,v}(R,G,B)$ 表示为

$$M'_{u,v}(R,G,B) = M_{u,v}(R,G,B) - MO_{u,v}(R,G,B) \quad (1)$$

式中, $M_{u,v}(R,G,B)$ 表示捕获的色块编码图, $MO_{u,v}(R,G,B)$ 为捕获的背景图, (u,v) 表示捕获图像中的像素点坐标。

2) 饱和度提取

投影显示表面可能出现斑点花纹等特征,造成捕获到的图像在这些区域上亮度很低,而斑点花纹的光谱选择性却使得在该区域的色块饱和度上升。由此,在二值化时高饱和度低亮度的区域仍将被识别为色块区域。

3) 灰度化

将每像素 24 位颜色降为 8 位无色彩表示,这里采用最大 RGB 值法,则对应的灰度图像 $M'_{u,v}(GS)$ 为

$$M'_{u,v}(GS) = \max \{ M'_{u,v}(R), M'_{u,v}(G), M'_{u,v}(B) \} \quad (2)$$

4) 灰度直方图阈值计算

采用可自动确定阈值的 Otsu 大津法^[7],把所有灰度化图像的像素分为两组,使两组像素的组内方差最小来确定阈值。Otsu 的适用条件为直方图中有明显的双峰,本研究中一个峰代表色块,另一个峰代表背景,两峰之间的谷为阈值 T_0 ,如图 4 所示。

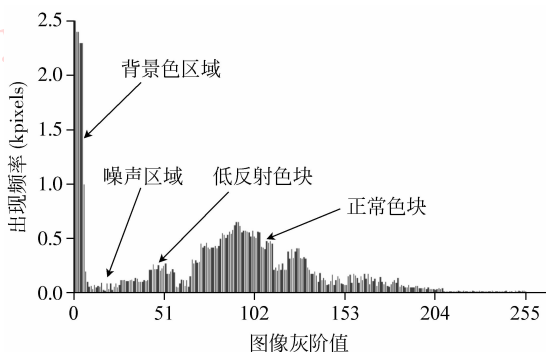


图 4 捕获图像灰度直方图

Fig. 4 The grayscale histogram of one captured image

5) 光亮度不均匀补偿

投影仪和相机均存在边缘比中心暗的现象,这是由光学系统限制产生的。经去背景处理,相机的不均匀性被抵消而不再考虑。

放映系统屏幕上的亮度分布满足:

$$P_{u,v} = P_0 \times \cos^4 W_{u,v} \quad (3)$$

式中, P_0 为屏幕中心的亮度, $W_{u,v}$ 是像素 (u,v) 的对应视角, $P_{u,v}$ 为对应的投影光强度(不包括环境光对屏幕的贡献)。

若相机捕获图像与投影图像大小相近且中心大致对准,则其亮度不均匀性将在捕获图像上得到补偿。前述的灰度阈值 T_0 是全局平均的阈值,由于背景均较暗,而二值化的主要目的是提取出带有花纹色彩的色块并消去背景中可能出现的亮点,故将 T_0 视为图像中心的灰度阈值,而图中其他区域的阈值则根据投影仪的特性取为

$$T_{u,v} = T_0 \times \cos^4 \left(\arctg \left(\frac{D'}{DI} \times \frac{DI}{d} \right) \right) \quad (4)$$

式中, D' 表示像素点 (u,v) 到图像中心的距离, DI' 表示图像的半对角线长度, DI 为投影区域半对角线长度, d 是投影仪镜头到投影屏幕中心的距离。

6) 二值化

通过判断像素点 (u,v) 的灰度与饱和度,即可得到二值化图像:

$$M'_{u,v}(BW) = \begin{cases} 1 & M'_{u,v}(GS) \geq \\ & threshold_{u,v} \parallel M'_{u,v}(GS) > \\ & k_1 \times threshold_{u,v} \&\& M'_{u,v}(S) > k_2 \\ 0 & \text{其他} \end{cases} \quad (5)$$

式中, $M'_{u,v}(BW)$ 为二值化后图像, $M'_{u,v}(GS)$ 为捕获图的灰度图, $M'_{u,v}(S)$ 是捕获图像的饱和度图,系数 k_1 和 k_2 乃可调因子,由实验条件具体确定。

1.3 二值图像修复

经过二值化的捕获图像 $M'_{u,v}(BW)$ 含大量噪点以及屏幕特性可能带来的色块相连等缺陷,故提取色块坐标前须对其进行图像的形态学滤波处理^[8],包括图像降噪、腐蚀膨胀、连通区域标记等主要步骤以修复色块的形态。图像处理只须对色块全排列图进行处理便能获得各个色块的坐标值,而建立该捕获图像色块坐标与设计的投影图像色块坐标之间的映射关系需对编码捕获图像序列进行解码才能实现。

采用 5×5 窗口的滤波算子进行条件滤波,通过计算某一点周围的白点像素数以及设定选取阈值(低于某值则该点置为黑色),可除去 95% 以上的颗粒噪声、色块边沿的毛刺以及色块间可能出现的极细连线。腐蚀膨胀过程中的结构元形状采取菱形,膨胀算法结构元采取矩形,可复原色块形状,消除色块突起部位及填补可能存在的空洞,而结构元大小(边长)根据色块平均面积进行动态设置。然后进行连通区域标记^[8],获取当前连通区域数目并判断是否等于色块数,通过计算平均面积移除非期望的连通区域(移除残留的噪声)。同时,因一个连通区域由相同整数表示,故计算每个连通区域的中心坐标非常方便。

1.4 几何映射关系建立

在获取设计的投影色块排列图和连通区域标记过的二值图中的坐标后,按第 1.1 节的编码规则可解码建立色块的映射关系:对于捕获色块排列图中的每个色块坐标,按第 1.2 节的二值化原理判断其在随后的图像中处于明/暗的规律,可获取其各自的编码。通过设定的识别码,便获得投影图和捕获图色块坐标的映射关系。

考虑到实际场景中投影图和捕获图存在除旋转、仿射、扭曲等变换外还可能存在于曲面、畸变等因素,故采用三次多项式函数拟合。若将投影输入图像色块 i 的中心坐标记为 $\mathbf{I}_i = [x_i, y_i]^T$,捕获图像色块 j 的坐标记为 $\mathbf{M}_j = [u_j, v_j]^T$,令 $\mathbf{I}'_i = [x_i^3, x_i^2 y_i, x_i y_i^2, y_i^3, x_i^2, y_i^2, x_i y_i, x_i, y_i, 1]^T$, $\mathbf{M}'_j = [u_j^3, u_j^2 v_j, u_j v_j^2, v_j^3, u_j^2, v_j^2, u_j v_j, u_j, v_j, 1]^T$ 。基于多个色块中心点对(训练样本)的拟合可找到矩阵 \mathbf{A} (和逆矩阵 \mathbf{A}^{-1}),并满足 $\mathbf{I}'_i = \mathbf{A} \times \mathbf{M}'_j$ 及 $\mathbf{M}'_j = \mathbf{A}^{-1} \times \mathbf{I}'_i$ 。由此,建立了投影图像面到捕获图像面的像素级几何映射关系。此矩阵变换关系可简化为拟合 4 个有关多项式便可获取投影面到捕获面的配准关系转换,即

投影面到捕获面横向转换函数:

$$u(x, y) = a_9 x^3 + a_8 x^2 y + a_7 x y^2 + a_6 y^3 + a_5 x^2 + a_4 x y + a_3 y^2 + a_2 x + a_1 y + a_0 \quad (6)$$

投影面到捕获面纵向转换函数:

$$v(x, y) = b_9 x^3 + b_8 x^2 y + b_7 x y^2 + b_6 y^3 + b_5 x^2 + b_4 x y + b_3 y^2 + b_2 x + b_1 y + b_0 \quad (7)$$

捕获面到投影面横向转换函数:

$$x(u, v) = c_9 u^3 + c_8 u^2 v + c_7 u v^2 + c_6 v^3 + c_5 u^2 + c_4 u v + c_3 v^2 + c_2 u + c_1 v + c_0 \quad (8)$$

捕获面到投影面纵向转换函数:

$$y(u, v) = d_9 u^3 + d_8 u^2 v + d_7 u v^2 + d_6 v^3 + d_5 u^2 + d_4 u v + d_3 v^2 + d_2 u + d_1 v + d_0 \quad (9)$$

2 实验与结果

在实验中,通过投影仪相机系统,由投影仪投出编码图像,同时相机捕获在显示表面上的投影图像,即可由本文算法自动完成配准。

2.1 实验设备及环境

实验中的投影仪相机系统由 PC 机、NEC 公司的 LT30+ 型投影仪(分辨率 1024×768)、日立(HITACHI)公司的 HV-D30 型相机(分辨率 768×576)以及各种投影显示表面组成。图像采集设备采用 Matrox 公司的 Meteor II/Multi-channel 采集卡,实验所用投影显示表面包括由灰色、浅彩色、深彩色分别与近似平面、非规则曲面组合而造成六种投影面,其中灰色平面材质为漫反射表面,彩色平面均为带光泽的塑料压模纸面。

2.2 实验结果及讨论

由投影仪依次投出全黑图、色块排列图、色块编码图序列,同时相机即时采集每幅图像,经计算机自动处理后可得到如图 5 所示流程的分步图像(以色块数 $N=1200$ 为例),其中的图示均以对应图像左上角的一部分作为样本示意。

解码后,图 5 所示的投影图像面和相机图像面中色块的对应关系得到确立,以此作为样本点进行拟合,其总体配准精度评价结果如表 1 所示。

由表 1 可见,算法的配准偏差平均约为 0.3 个像素,偏差越大其出现的概率急剧下降;在 0.5 个像素精度上已可预测出大部分的像素间映射关系,因此该方法能精准地针对每个像素点的屏幕信息进行计算和补偿。由表 1 可知,由投影面到捕获面的转换函数($u_i = u(x_i, y_i)$ 与 $v_i = v(x_i, y_i)$)配准偏差低于逆向拟合($x_i = x(u_i, v_i)$ 与 $y_i = y(u_i, v_i)$),这是由于 (x, y) 代表分辨率为 1024×768 的投影面,而 (u, v) 代表分辨率为 768×576 的捕获面,即在空间上 x, y 的分辨率更高,故其作为自变量时可使函数值精度更高。另外,横向转换函数($u_i = u(x_i, y_i)$ 与 $x_i = x(u_i, v_i)$)的配准精度优于纵向($v_i = v(x_i, y_i)$ 与 $y_i = y(u_i, v_i)$),这是因为相机和投影仪主要为竖直放置,从而造成横方向上的角度变化较小。

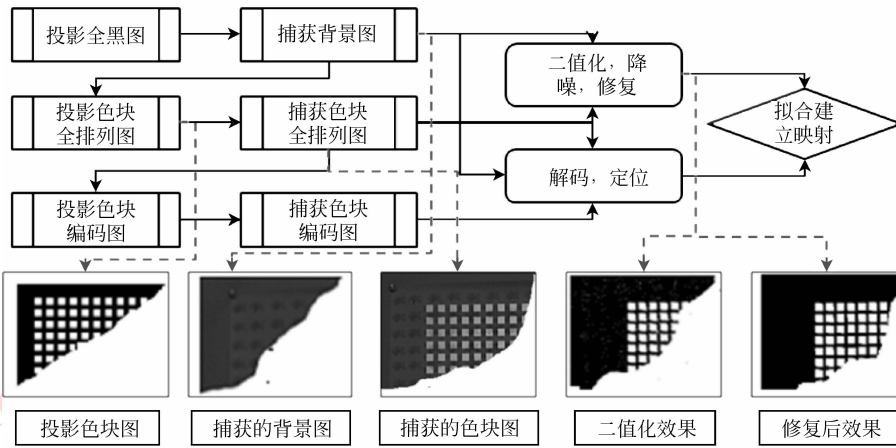


图 5 配准算法图像处理流程

Fig. 5 Several main procedures of image registration

表 1 样本点的配准偏差 /pixel

Tab. 1 The description of registration error on training data

| | 平均偏差 | 90% 置信度偏差 | 最大偏差 |
|---------------|------|-----------|------|
| $u(x_i, y_i)$ | 0.20 | 0.32 | 0.62 |
| $v(x_i, y_i)$ | 0.25 | 0.42 | 1.01 |
| $x(u_i, v_i)$ | 0.29 | 0.46 | 1.32 |
| $y(u_i, v_i)$ | 0.37 | 0.60 | 1.49 |

为验证本文算法在不同特性投影显示表面上的适用性,在实验中营造了不同的场景并分别采用不同的色块数进行测试,结果如表 2 所示,表中 M 为图像面宽度上的色块数, N 为高度上的色块数。

表 2 在不同投影显示表面上采用不同色块数的几何配准实验结果 /pixel

Tab. 2 The geometric registration results for different experimental scenes

| 色块数 ($M \times N$) | 营造的投影显示表面 | | | | | |
|-------------------------|-----------|------|------|------|------|------|
| | 浅灰平 | 浅彩平 | 深彩平 | 灰曲面 | 浅彩曲 | 深彩曲 |
| $20 \times 15 = 300$ | 0.26 | 0.29 | 0.31 | 0.34 | 0.88 | 0.98 |
| $29 \times 22 = 638$ | 0.27 | 0.30 | 0.32 | 0.35 | 0.85 | 0.97 |
| $37 \times 27 = 999$ | 0.27 | 0.28 | 0.34 | 0.34 | 0.82 | 1.00 |
| $40 \times 30 = 1\ 200$ | 0.28 | 0.30 | 0.33 | 0.35 | 0.85 | 1.02 |
| $46 \times 35 = 1\ 610$ | 0.29 | 0.29 | 0.33 | 0.32 | 0.81 | 0.92 |

可见,在不同场景下,其平均配准偏差在 0.2 至 1.0 像素内,且图像配准效果与色块数无关,色块数减少不影响系统精度,算法的稳定性得到证明。平面屏幕的效果比曲面好,这是因为平面在理论上只涉及线性变换,故平面的配准变换函数主要与一次

项和常数项相关,二次项系数几乎为零。同时,灰色面的配准效果优于浅彩色表面,更优于深彩色。彩色平面(包括其光泽特性)易使色块形状缺损,造成额外误差;不同部位的反射光强弱也是影响配准精度的因素之一,漫反射特性不佳的曲面其各区域的反射性能不同,从而引起捕获图像的色块部分失真。尽管如此,总体平均配准偏差仍达 1 个像素左右,处于人眼的空间可辨阈值之内,可满足实际应用之要求。

该算法的实际应用效率亦可满足需求。投影和采集编码图像中,可以 0.5 s/幅的速率进行,即使采用 1 610 的色块数量,其耗时亦不足 6 s。而建立配准的过程由程序自动完成,在 CPU P4 2.0 G/内存 512 M/显卡 5200 64 M 的平台下,耗费 4 s 即可完成投影面和捕获图面的配准关系。

3 结 论

基于数字图像处理和对样本点多项式拟合方式,提出了投影仪相机系统中输出设备和反馈设备之间的图像配准算法,即应用色块取样、编码以及特有的二值化方法、形态学处理等技术实现了投影图像面和捕获图像面像素之间的映射关系。实验结果表明,该方法适用性广,可稳定地应用于不同的场景,能在允许环境光(如灯光、窗外光线等)存在的条件下,在曲面且具有彩色斑纹的显示表面上获得高效精确的图像几何配准效果。该方法可有效地用于相机反馈式投影仪启动时配准关系的建立,以便实际投影过程中对投影图像进行颜色校正。

参考文献 (References)

- [1] Grossberg M D, Peri H, Nayar S K, et al. Making one object look like another: controlling appearance using a projector-camera system [C] // Proceedings of IEEE Computer Society Conference on CVPR. Washington, DC, USA: IEEE Computer Society, 2004: 452-459.
- [2] Zou W, Xu H, Han B, et al. A novel methodology for photometric compensation of projection display on patterned screen [J]. Chinese Optics Letters, 2008, 6(7): 499-501.
- [3] Wang D, Sato I, Okabe T, et al. Radiometric compensation in a projector-camera system based on the properties of human vision system [C] // Proceedings of IEEE Computer Society Conference on CVPR, San Diego, CA, USA: IEEE Computer Society, 2005: 100-108.
- [4] Fujii K, Grossberg M D, Nayar S K. A projector-camera system with real-time photometric adaptation for dynamic environments [C] // Proceedings of IEEE Computer Society Conference on CVPR, San Diego, CA, USA: IEEE Computer Society, 2005, 814-821.
- [5] Nayar S, Grossberg M, Peri H. Methods and Systems for Compensating an Image Projected onto A Surface Having Spatially Varying Photometric Properties: United States, US 2005/015490 AL, [P]. 2005-2-8.
- [6] Battle J. Recent progress in coded structured light as a technique to solve the correspondence problem: A survey [J]. Pattern Recognition, 1998, 31(7): 963-982.
- [7] Otsu N. A threshold selection method from gray-level histograms [J]. IEEE Transactions on Systems, Man and cybernetics, 1979. 9(1): 62-66.
- [8] Shapiro L G, Stockman G C. Computer Vision [M]. Translated by Zhao Qingjie, et al. Beijing: China Machine Press, 2005, 65-80. [琳达·夏普罗, 乔治·斯托克莫. 计算机视觉 [M]. 赵清杰等译, 北京: 机械工业出版社, 2005, 65-80.]