

投影校正系统的参数标定技术研究

杨帆^{1,2}, 韩成^{1,2*}, 白宝兴^{1,2}, 张超^{1,2}

¹长春理工大学计算机科学技术学院, 吉林 长春 130022;

²特种电影技术及装备国家地方联合工程研究中心, 吉林 长春 130022

摘要 针对投影仪-摄像机系统参数标定过程中角点识别精度低、抗噪性差的问题, 提出一种新型的投影彩色模式特征图像和角点亚像素检测算法以提高角点检测识别精度。鉴于投影仪-摄像机在光子信号传输过程中会因系统通道耦合性导致光子信号损耗, 特进行建模分析, 并提出一种系统耦合性校正方案, 以降低系统耦合性串扰的影响。在系统标定参数解算过程中, 投影特征点会因外界因素的干扰而与摄像机反馈的特征信息匹配错误率高, 从而导致投影仪的标定参数误差值较大, 考虑到投影仪-摄像机具有对极几何约束关系, 提出一种成像反馈式的射影几何约束优化方法, 用于对系统参数优化标定。通过实验分析可知, 本文方法识别精度能够到达 0.25 pixel, 同时具有较高的面平行度和线垂直度。投影画面的几何畸变校正实验显示, 畸变校正效果基本符合人眼视觉感知一致性。

关键词 机器视觉; 标定; 角点检测; 对极几何; 几何校正

中图分类号 TP391

文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201838.0115001

Research on Parameter Calibration of Projection Correction System

Yang Fan^{1,2}, Han Cheng^{1,2}, Bai Baoxing^{1,2}, Zhang Chao^{1,2}

¹ School of Computer Science and Technology, Changchun University of Science and Technology,
Changchun, Jilin 130022, China;

² National and Local Combined Engineering Research Center of Special Film Technology and Equipment,
Changchun, Jilin 130022, China

Abstract In the process of the parameter calibration of projector camera system, the recognition accuracy of corner is low and the noise immunity is poor. To solve the above problems, a new projection color pattern feature image and a sub-pixel corner detection algorithm are introduced to increase the accuracy of corner detection and recognition. In the process of photon signal transmission, the projector-camera can cause photon signal loss due to the coupling of system channel, therefore, the system coupling is modeled and analyzed. And a system coupling correction scheme is proposed, which effectively reduces the system coupling crosstalk. In the process of calculating the system calibration parameters, due to the interference of external factors, the error of the calibration parameters of the projector is large. Considering that the projector camera has epipolar geometry constraint relationship, a projective geometry constrained optimization method based on imaging feedback is proposed to optimize the system parameters. The experimental results show that this method can achieve 0.25 pixel accuracy. Meanwhile, it has high plane parallelism and linear verticality. Projection distortion correction experiments show that the distortion correction effect of projection screen basically accords with human visual viewing consistency.

Key words machine vision; calibration; corner detection; epipolar geometry; geometric correction

OCIS codes 150.0155; 150.1488; 150.1135

收稿日期: 2017-06-02; 收到修改稿日期: 2017-08-15

基金项目: 国家自然科学基金(61602058)、吉林省科技发展计划(20160101258JC, 20150101015JC)

作者简介: 杨帆(1990—), 男, 博士研究生, 主要从事图像处理、计算机视觉、智能投影、三维重建等方面的研究。

E-mail: cclg_yangfan@163.com

导师简介: 白宝兴(1954—), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事计算机图形图像处理与识别、数字媒体技术与系统等方面的研究。E-mail: bxbai@cust.edu.cn

* 通信联系人。E-mail: hancheng@cust.edu.cn

1 引 言

在三维智能感知领域,投影仪-摄像机系统框架作为双目立体视觉的一个特殊分支,仿人眼方式理解感知物体的深度信息,在智能自主投影、三维重建、光学测量等领域得到快速发展^[1-2]。尤其是在智能感知投影展示技术中,为了使投影仪投射图像在非规则曲面上符合人眼视觉感知的一致性,投影仪需能“感知”到非规则曲面的深度信息,使得投影图像在不同的深度区域内映射对应的纹理图像信息。然而在利用投影仪-摄像机系统框架进行高精度感知的过程中,首先需要解决的就是系统参数标定问题,即获取投影仪和摄像机的内参数,以及两者之间的外参数。由于投影仪无法像摄像机一样“理解”图像特征信息,因此,目前标定方式普遍采用投影仪投射模式特征图像至标定靶上,通过摄像机拍摄调制的模式特征信息建立投影仪和摄像机之间的映射关系,然后利用映射关系使得投影仪能够感知匹配标定靶上的特征信息和模式特征图像上的特征信息^[3-4]。在建立上述匹配关系时,投影仪参数标定问题就转换到摄像机标定模式中。虽然上述过程简单、高效,但是极易受到摄像机标定精度和外界环境因素的干扰。为解决上述问题,对智能感知投影系统中涉及的投影仪-摄像机参数标定问题开展研究。

摄像机标定问题是求解摄像机内外参数的关键过程。随着计算机视觉技术的快速发展,摄像机标定的方式也从二维过渡到一维模式中^[5-6],然而摄像机一维标定模式不适用于投影仪-摄像机联合标定过程。在摄像机二维标定模式研究中:文献[7]提出了一种通过预校正的矩阵相机获取小型标定靶标图案特征点分布信息的方法;文献[8]针对摄像机标定过程中如何选择摄像机模型的问题进行分析,通过比较,提出3个性能指标,服务于不同摄像机畸变问题的合理选择;文献[9]提出一种相移法代替傅里叶变换提取相位的方法,该方法能够有效避免点阵边缘模糊现象,然而普适性受到一定的限制。在投影仪-摄像机的标定研究中:文献[10]为了建立靶标和投影特征之间的关系,采用两步法结合动态投影匹配特征点进行系统参数的标定,该方法在一定程度上提高了系统参数的精度,然而整体算法过程较复杂;文献[11]通过分析成像畸变产生的规律,提出利用同心圆环进行多区域标定的方法;文献[12-13]对投影仪-摄像机系统的成像结构进行分析探讨,提出

一种投影仪和摄像机共轴的结构模式,较传统结构模式标定精度高,然而在进行共轴环境搭建过程时不具备通用性;文献[14-15]采用结构光相位匹配技术对投影仪-摄像机系统进行参数标定,然而该模式易受到环境因素的干扰,导致相位识别率降低。基于此,本文对投影校正系统的参数标定方法进行研究。首先,对投影仪-摄像机三维感知数学模型进行分析;然后,对系统的颜色耦合性问题进行信号建模,由于系统的标定精度关键在于角点识别的精度,为此,利用设计的新型彩色模式特征图像,结合角点亚像素检测算法以及彩色信息引导进行角点匹配;最后,利用射影成像反馈式成像标定法进行系统参数标定。

2 智能感知系统深度数学模型

在计算机视觉中,为了使得计算机能够像人一样感知、理解物体在三维空间中的深度拓扑分布,通常采用仿人眼模式的双目立体视差模型,即利用双目针孔透视成像原理对物体深度信息进行定位^[16]。由于投影仪-摄像机系统类似于双目立体成像模型,因此,本文凭借该模型对投影仪-摄像机的智能感知进行分析,其中,智能深度感知成像原理如图1所示。

设智能感知系统观察空间中任意一点在空间全局坐标系下为 $A_G = (X_G, Y_G, Z_G)$, 齐次坐标表示为 \tilde{A}_G , 在投影仪和摄像机成像坐标系的坐标值分别为 $a_p = (u_p, v_p)$ 、 $a_c = (u_c, v_c)$, 相对应的齐次坐标分别为 \tilde{a}_p 、 \tilde{a}_c , 根据透视投影成像原理, 空间中的三维点和投影仪、摄像机成像平面之间的对应关系为

$$s_c \tilde{a}_c = \mathbf{K}_c [\mathbf{V}_c \quad \mathbf{T}_c] \tilde{A}_G, \quad s_p \tilde{a}_p = \mathbf{K}_p [\mathbf{V}_p \quad \mathbf{T}_p] \tilde{A}_G, \quad (1)$$

式中 s_c 、 s_p 为尺度因子, \mathbf{K}_c 、 \mathbf{K}_p 、 $[\mathbf{V}_c \quad \mathbf{T}_c]$ 、 $[\mathbf{V}_p \quad \mathbf{T}_p]$ 分别为投影仪和摄像机的内、外参数矩阵。将(1)式中空间全局坐标系下的 \tilde{A}_G 进行消除变换, 得到投影仪和摄像机成像感知对应关系模型:

$$s_c \tilde{a}_c = \mathbf{K}_c [\mathbf{V}_c \quad \mathbf{T}_c] s_p \{ \mathbf{K}_p [\mathbf{V}_p \quad \mathbf{T}_p] \}^{-1} \tilde{a}_p. \quad (2)$$

可以看出, 对摄像机标定完成后, 利用两者之间的成像素点匹配, 即可标定投影仪的参数。

3 系统参数标定

3.1 颜色通道耦合性建模分析

在智能感知投影系统中, 投影机投射彩色图像, 而摄像机进行图像的采集。在这一过程中, 由于投

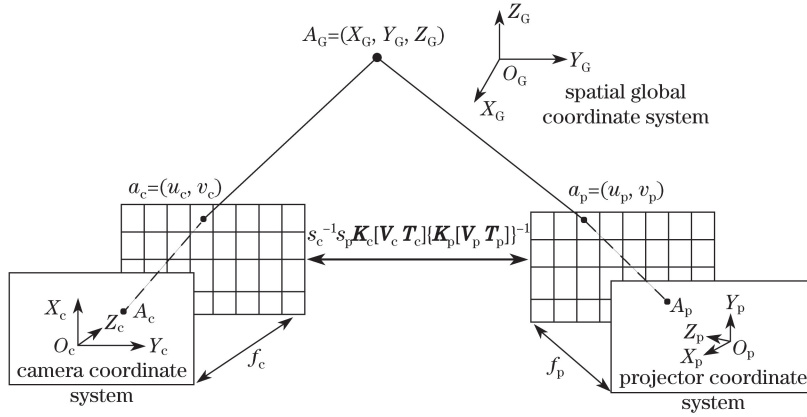


图 1 智能感知系统深度成像模型

Fig. 1 Depth imaging model of intelligent perception system

影机的颜色通道和摄像机的颜色通道之间会存在颜色光谱曲线重叠干扰,造成通道内的色彩光子信号能量叠加干扰损耗。颜色通道的耦合性问题,会导致摄像机采集的颜色光谱信号和原始投影色彩信号光谱不一致;因此,在智能感知投影系统中,当投影模式特征图像为彩色模式图案时,会存在色彩信息损耗问题,使得模式特征点的匹配存在丢失、误匹配现象。为此,本文首先对系统颜色通道的光谱耦合进行建模分析。

摄像机将捕捉到的色彩光谱信号聚焦在镜头的 CCD 上累积,而本文摄像机拍摄的光束信号是从投影仪投射的光束信号,因此图像的色彩像素信息经投影仪显色机处理后,通过显色表面的反射被摄像机呈色物理器件传输至感应面上。该过程中信号处理模型为

$$\begin{bmatrix} I_C^R \\ I_C^G \\ I_C^B \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} m_{rr} & m_{rg} & m_{rb} \\ m_{gr} & m_{gg} & m_{gb} \\ m_{br} & m_{bg} & m_{bb} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} k_r & 0 & 0 \\ 0 & k_g & 0 \\ 0 & 0 & k_b \end{bmatrix} \mathbf{F} \begin{bmatrix} I_P^R \\ I_P^G \\ I_P^B \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} I_o^R \\ I_o^G \\ I_o^B \end{bmatrix}, \quad (3)$$

简化形式为 $I_C = \mathbf{M}_{cross} \mathbf{K} \mathbf{F} \{I_P\} + \mathbf{A}_o$, 其中 I_C 、 I_P 表示摄像机和投影仪中的像素信息值, \mathbf{M}_{cross} 表示系统的光线传输串扰矩阵, \mathbf{K} 为物体表面反射矩阵, $\mathbf{F} \{I_P\}$ 为非线性变换矩阵, \mathbf{A}_o 为环境光信息值。

系统颜色耦合性问题转换为(3)式中的参数求解问题。为了便于求解,首先设定标定模块的反射系数为 1,接着利用摄像机拍摄标定模板在自然环境下求解 \mathbf{A}_o ,接着利用投影仪分别投射单通道纯色标准色,通过摄像机分别拍摄对应图像,利用(3)式结合最小二乘法优化求解,即可获取上述参数信息值。利用求得的参数值构建校正矩阵,即可修正颜色串扰现象。

3.2 彩色模式特征图像生成

系统参数标定过程中,模式特征图像的角点位置信息直接决定了系统的标定精度。为了能够快速、高精度地定位角点,设计了一种彩色化模式特征图像。为了充分利用彩色信息,彩色化模式特征图像采用方形色彩块模式进行组合构建,称方形色彩块为色彩方元,其中色彩方元的颜色信息分别为红色、绿色、蓝色、青色、品红色、黄色、黑色、白色。为了避免颜色通道之间的干扰,对这些颜色进行模式特征化组合,即划分组合方元——(品红色,绿色)、(青色,红色)、(黄色,蓝色),如图 2(a)所示,其中组合方元中的第一个元素称为低值色彩,第二个元素称为高值色彩。将上述 3 类组合模式进行相邻区域连接,组合类别之间采用黑色方元进行分割。

将黑色方元作为生成彩色模式特征图像的起始位置,将其放置于待生成图像的中心位置,紧接着对该黑色方元的 8 邻域进行色彩化处理,即将白色方元放置于黑色方元的 4 邻域处,将组合方元中的品红色放置于黑色方元的 D 邻域处,从而构成如图 2(b)所示的 3×3 色彩区域。对黑色方元 D 邻域处的每个品红色方元的 4 邻域中没有色彩化的邻域放置白色方元,对每个品红色方元的 D 邻域中没有色彩化的邻域放置绿色方元。紧接着对每个绿色方元的 4 邻域中没有色彩化的邻域放置白色方元,对每个绿色方元的 D 邻域中没有色彩化的邻域放置黑色方元,从而构成如图 2(c)所示的色彩化结构区域。

对组合方元中(青色,红色)进行色彩化结构处理,即对色彩化结构区域中的每个黑色方元的 4 邻域中没有色彩化的邻域放置白色方元,对每个黑色方元的 D 邻域中没有色彩化的邻域放置低值色彩

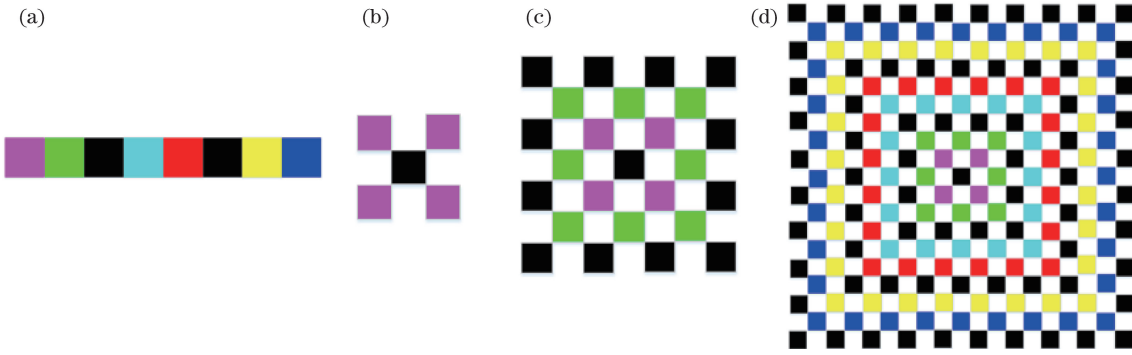


图 2 彩色模式特征图像生成过程

Fig. 2 Generation of color pattern feature image

方元,同时对每个低值色彩方元的 4 邻域中没有色彩化的邻域放置白色方元,对每个低值色彩方元的 D 邻域中没有色彩化的邻域放置高值色彩方元,构成另一个色彩化结构区域。对组合方元中(黄色,蓝色)同理按照组合方元(青色,红色)的方式进行色彩化结构处理,从而构成如图 2(d)所示的彩色模式特征图像。可以看出,所设计的彩色模式特征图像由 3 个色彩化结构区域构成一个整体的色彩拓扑结构,因此在角点提取时,具有较强的抗干扰性。

3.3 角点亚像素检测算法

利用投影仪投射上述彩色模式特征图像。由于摄像机采集图像存在透视问题,导致方形色彩块之间存在角点畸变,加之投影仪的摆放姿态会导致角点产生离散化效应,使得提取的角点位置不精确。观

察设计的彩色模式特征图像可知,角点是由不同的色块区域相交构成,据此提出一种角点亚像素检测算法。为了能够快速检测到角点,定义待检测图片中的某一像素点为 $X_i = (p_i, q_i)$,对应的色彩值为 $C_i = (a_i, b_i, c_i)$,以像素点 X_i 为中心、长度为 $2L+1$ 构成平滑移动检测窗口,其中检测窗口要小于彩色模式特征图像中色块长度的 $1/2$,具体值可根据实际需要设定,定义为 $W_i(X_i, L) = \{X_j \mid |X_j - X_i| \leq L\}$,由于角点邻域的色彩信息值具有变化不连续性,为此将图像中的像素从所在的二维空间转换到一维空间中,即将平滑移动检测窗口进行长度缩放,得到逐像素离散分层 $D_m(X_i, M)$,其中 $D_m(X_i, M) = \{X_d \mid X_d \in W_i(X_i, M) - W_i(X_i, M-1), 1 \leq M \leq L\}$,如图 3 所示。

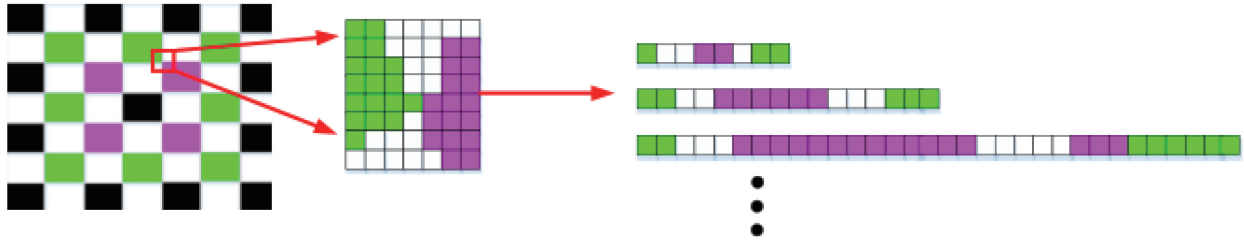


图 3 彩色信息引导离散分层效果图

Fig. 3 Color information guided discrete hierarchical

结合上述概念,同时利用彩色像素信息进行角点亚像素检测,算法步骤如下:

1) 利用平滑移动窗口对待检测图像进行逐像素搜索。由于本文设计的彩色模式特征图像的角点,其邻域是由不同颜色块相交而成,因此当平滑移动窗口在某一点 $X_i = (p_i, q_i)$ 进行任意方向微小偏移 (u, v) 时,会导致像素强度发生剧烈改变,移动窗口的强度变化量为

$$I(p_i, q_i) = \sum f_{w_i}(p_i, q_i) \cdot [X_j(p_{i+u}, q_{i+v}) - X_i(p_i, q_i)]^2 = \sum f_{w_i}(p_i, q_i) \cdot [u^2 p_i^2 + v^2 q_i^2 + 2uv p_i q_i], \quad (4)$$

式中 $f_{w_i}(p_i, q_i)$ 为移动窗口函数。对(4)式进行矩阵变换,得到:

$$I(p_i, q_i) = (u, v) \boldsymbol{\psi} \begin{pmatrix} u \\ v \end{pmatrix}, \quad (5)$$

式中 $\boldsymbol{\psi} = f_{w_i}(p_i, q_i) \begin{bmatrix} p_i^2 & p_i q_i \\ p_i q_i & q_i^2 \end{bmatrix}$ 。利用矩阵 $\boldsymbol{\psi}$ 中的特征值,判断该点是否为候选种子角点,如果是候选种子角点,则执行 2) 进一步处理。

2) 由于在模式特征图角点的邻域周围内存在很多候选种子角点,为此需对角点进行亚像素识别定位。利用前述的逐像素离散分层,得到由像素点构

成的一维分层集合 $\{D_1(X_i, M), D_2(X_i, M), \dots, D_L(X_i, M)\}$, 用直方图统计移动窗口中像素点的色彩信息值分布(除去纯白色), 得到 2 个 RGB 颜色空间的归类集 $\{I_k^1, I_k^2\}$, 接着利用下式计算每层中像素点的色差值归属差异性, 也就是像素点到 RGB 颜色空间归类集的距离:

$$d_i^s = \sqrt{(a_i - R_s)^2 + (b_i - G_s)^2 + (c_i - B_s)^2}, \quad (6)$$

式中的 (R_s, G_s, B_s) 为归类集 $\{I_k^1, I_k^2\}$ 中的第 s 个类别颜色值。

3) 设定一个阈值 φ 。如果 $d_i^s \geq \varphi$, 说明该像素点和所有归类集的差异性较大, 赋值为纯白色; 如果 $d_i^s \leq \varphi$, 将该像素点的色彩值赋值为 $\min(d_i^s)$ 中所属类别的颜色值。阈值 φ 可根据实际环境条件设定。通过该方式即可对分层集合 $\{D_1(X_i, M), D_2(X_i, M), \dots, D_L(X_i, M)\}$ 中每个像素点的色彩信息值进行设定。

4) 针对 $D_i(X_i, M) = \{P_1, P_2, \dots, P_{\text{num}}\}$ 层中的每个像素点 (num 表示该层共包含的像素点个数), 利用 S_i 求解该层的微分和:

$$S_i = \left(\sum_{r=1}^{\text{num}} |P_{r+1} - P_r| \right) + |P_{\text{num}} - P_1|. \quad (7)$$

设定一个概率阈值 ρ , 如果存在至少 $\rho \times L$ 层满足 $S_i = 4$, 则说明该候选种子角点为模式特征图像的亚像素角点。为便于角点匹配, 对识别的角点进行色彩线索化, 即 (X_i, I_k^1, I_k^2) 。

在进行投影仪-摄像机标定过程中, 利用摄像机采集投影仪投射的彩色模式特征图像, 通过上述过程能够快速提取彩色模式特征图像的角点信息及色彩线索信息, 利用色彩线索信息对投影仪原始彩色特征图像的角点进行匹配, 能够有效提高角点匹配正确率。该方式不仅快速便捷, 而且检测识别匹配正确率也较传统方式高。

3.4 射影几何约束优化标定算法

因各种因素干扰, 投影仪投射的特征点和摄像机反馈的信息常无法匹配, 使得投影仪标定出的参数误差值较大。考虑到投影仪-摄像机具有对极几何约束关系, 为此, 设计一种成像反馈式的射影几何约束优化方法, 具体算法如下。

1) 以标准棋盘格特征图像作为靶标, 将其放置于投影仪和摄像机的共同视野区域下, 利用相机采集特征成像二维值 $(u_i^{\text{cam}}, v_i^{\text{cam}})$, 设特征点在世界坐标系下坐标值为 (X_i, Y_i, Z_i) , 则由针孔成像模型可得:

$$\lambda(u_i^{\text{cam}}, v_i^{\text{cam}}, 1)^T = \mathbf{K}_{\text{cam}} [\mathbf{V}_{\text{cam}}^{\text{target}} \mathbf{T}_{\text{cam}}^{\text{target}}] (X_i, Y_i, Z_i, 1)^T = \mathbf{H}_{\text{cam}}^{\text{target}} (X_i, Y_i, Z_i, 1)^T, \quad (8)$$

式中 $\mathbf{H}_{\text{cam}}^{\text{target}}$ 为相机相对于特征图像的单应性矩阵。

2) 投影仪和摄像机成像过程是一个互逆的过程。为了建立投影仪和摄像机之间的单应性关系, 将本文设计的彩色特征图像特征投射到靶标上, 通过摄像机采集投影特征图像, 同时利用 3.3 节提出的角点亚像素检测算法, 获取角点特征坐标值为 $M_i^{\text{cam}} = (a_i^{\text{cam}}, b_i^{\text{cam}})$, 以及该角点的色彩线索信息值, 从而匹配对应的投影特征坐标值为 $N_i^{\text{pro}} = (\tilde{a}_i^{\text{pro}}, \tilde{b}_i^{\text{pro}})$ 。由于部分投影特征值和相机采集的特征值匹配误差较大, 不利于投影仪参数的标定, 因此通过对极几何原理进行约束。首先, 利用匹配的投影特征值求解投影仪-摄像机的基础矩阵 $\mathbf{F}_{pc}^{\text{num}}$, 最优的特征匹配点对到其对应特征点的极线距离误差值最小, 为此通过下式对特征点对进行几何误差的判断:

$$\phi_d(i) = d(M_i^{\text{cam}}, \mathbf{F}_{pc}^{\text{num}} N_i^{\text{pro}})^2 + d(N_i^{\text{pro}}, \mathbf{F}_{pc}^{\text{numT}} M_i^{\text{cam}})^2 = \frac{(M_i^{\text{camT}} \mathbf{F}_{pc}^{\text{num}} N_i^{\text{pro}})^2}{(V_i)_1^2 + (V_i)_2^2} + \frac{(M_i^{\text{camT}} \mathbf{F}_{pc}^{\text{num}} N_i^{\text{pro}})^2}{(W_i)_1^2 + (W_i)_2^2}, \quad (9)$$

式中 $(V_i)_j$ 、 $(W_i)_j$ ($j=1, 2$) 分别表示 $\mathbf{F}_{pc}^{\text{num}} N_i^{\text{pro}}$ 向量和 $\mathbf{F}_{pc}^{\text{numT}} M_i^{\text{cam}}$ 向量的第 j 个元素值。

3) 为了降低误差较大的特征点对对投影仪标定产生的影响, 剔除 $\max\{\phi_d(i)\}$ 中最大值, 再将剩下的特征匹配点对重新执行步骤 2), 直到下式达到最小值:

$$\tilde{\mathbf{H}}_{\text{cam}}^{\text{pro}} = \arg \min_{\mathbf{H}_{\text{cam}}^{\text{pro}}} \|\mathbf{M}_i^{\text{cam}} - \mathbf{H}_{\text{cam}}^{\text{pro}} \mathbf{N}_i^{\text{pro}}\|^2. \quad (10)$$

记录下最优特征匹配点对。由于镜头畸变等因素影响, 因此存在一定的误差。为了提高标定精度, 采用光束法平差优化投影仪各个参数。通过光束法平差思想对误差方程进行优化求解, 从而降低投影特征点对标定参数产生的影响, 进一步提高投影仪的标定精度:

$$\mathbf{L}_i = [\mathbf{A}_i \quad \mathbf{B}_i] \begin{bmatrix} \mathbf{g}_{xl} \\ \mathbf{g}_{il} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \tilde{a}_i^{\text{pro}} - a_i^{\text{pro}} \\ \tilde{b}_i^{\text{pro}} - b_i^{\text{pro}} \end{bmatrix}, \quad (11)$$

$$\text{式中 } \mathbf{A}_i = \begin{bmatrix} \frac{\partial \tilde{a}_i^{\text{pro}}}{\partial h_{11}} & \frac{\partial \tilde{a}_i^{\text{pro}}}{\partial h_{12}} & \dots & \frac{\partial \tilde{a}_i^{\text{pro}}}{\partial h_{33}} \\ \frac{\partial \tilde{b}_i^{\text{pro}}}{\partial h_{11}} & \frac{\partial \tilde{b}_i^{\text{pro}}}{\partial h_{12}} & \dots & \frac{\partial \tilde{b}_i^{\text{pro}}}{\partial h_{33}} \end{bmatrix}, \mathbf{B}_i = \begin{bmatrix} \frac{\partial \tilde{a}_i^{\text{pro}}}{\partial X_i^{\text{pro}}} & \frac{\partial \tilde{a}_i^{\text{pro}}}{\partial Y_i^{\text{pro}}} & \frac{\partial \tilde{a}_i^{\text{pro}}}{\partial Z_i^{\text{pro}}} \\ \frac{\partial \tilde{b}_i^{\text{pro}}}{\partial X_i^{\text{pro}}} & \frac{\partial \tilde{b}_i^{\text{pro}}}{\partial Y_i^{\text{pro}}} & \frac{\partial \tilde{b}_i^{\text{pro}}}{\partial Z_i^{\text{pro}}} \end{bmatrix},$$

$$\mathbf{g}_{xl} = \begin{bmatrix} \Delta h_{11} \\ \Delta h_{12} \\ \vdots \\ \Delta h_{33} \end{bmatrix}, \mathbf{g}_{il} = \begin{bmatrix} \Delta X_i^{\text{pro}} \\ \Delta Y_i^{\text{pro}} \\ \Delta Z_i^{\text{pro}} \end{bmatrix}.$$

4 实验分析比较

本文搭建的智能感知投影系统将摄像机拍摄视野包含于投影仪投射视野范围内,然后利用摄像机采集投影仪投射的特征信息,通过图像采集卡对摄像机采集的信息传递给计算机进行处理。系统采用的摄像机为大恒 CCD 镜头,分辨率为 2048 pixel \times 1536 pixel,投影机采用 view Sonic PJD6353,分辨率为 1024 pixel \times 768 pixel。在系统标定过程中,将投影仪投射的彩色模式特征图像投射到标定靶标上,为了获取高精度系统参数,需将标定靶标分别放置于不同视角范围内,使得系统能够感知标定靶标中特征信息在空间中的分布状况。整个系统框架,采用 C++、OpenCV、

MATLAB 等开发语言和工具进行组合实验测试分析。

4.1 系统耦合性校正分析

如图 4 所示,投影仪分别投射纯蓝色、纯红色、纯绿色的条纹,摄像机捕捉拍摄得到的图像进行系统耦合性分析。图 4(a)表示 3 组纯色图片分别在不同通道内的耦合现象,图 4(b)为二维显示效果图。从第二行图片能够明显观察到不同颜色通道之间的耦合性:当投影仪投射纯蓝色条纹时,可发现绿色通道较红色通道对蓝色通道的干扰更严重;当投影仪投射纯绿色条纹时,可发现蓝色通道较红色通道对绿色通道的干扰较明显;当投影仪投射纯红色条纹时,可发现蓝色通道较绿色通道对红色通道的干扰比较突显。

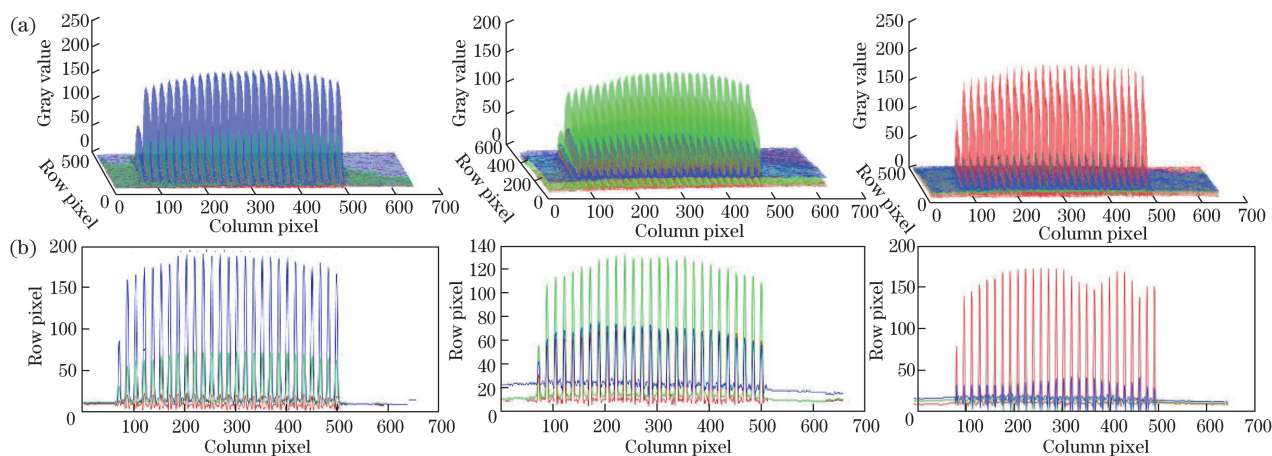


图 4 系统单通道耦合信号

Fig. 4 Coupling signal for single-channel of system

为了更好地突显不同颜色通道之间的耦合性,投影仪投射纯红、纯绿、纯蓝条纹进行交替的一副图像,如图 5 所示,可发现三通道之间互相干扰。因此,当投影仪投射一幅图像时,摄像机完成采集后会发现,

所采集的图像色彩信息明显较原始投影图像色彩偏暗,如图 6(a)所示。利用本文方法进行颜色耦合校正以后,可以明显提高各个色彩信息的纯度,如图 6(b)所示,降低了摄像机采集到的色彩信号损耗度。

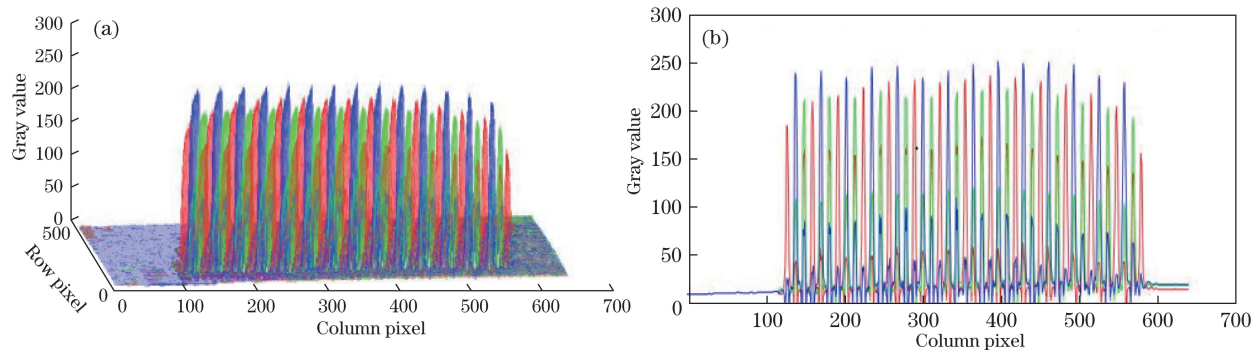


图 5 系统多通道耦合信号

Fig. 5 Coupling signal for multi-channel of system

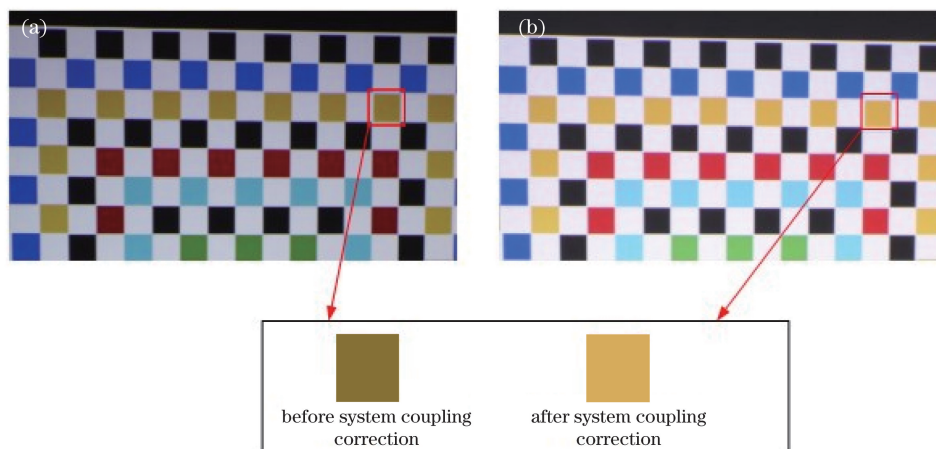


图 6 系统耦合性校正

Fig. 6 System coupling correction

4.2 标定精度分析

投影仪-摄像机系统标定的关键环节之一便是对投影仪投射特征图像进行特征点识别提取,特征点识别的精度越高,则系统标定精度也相对提高。为了验证本文设计的彩色模式特征图像的角点识别正确率,通过投影仪将彩色模式特征图像投射到表

面结构比较复杂的物体上,利用摄像机采集调制的彩色模式特征图像,可发现,调制的彩色模式特征图像的角点离散度较大,如图 7(a)所示,利用传统检测算法极易导致角点信息漏检,而利用本文方法对调制的彩色模式特征图像进行识别,调制的彩色模式特征图像的角点信息均可被识别检测,如图 7(b)所示。

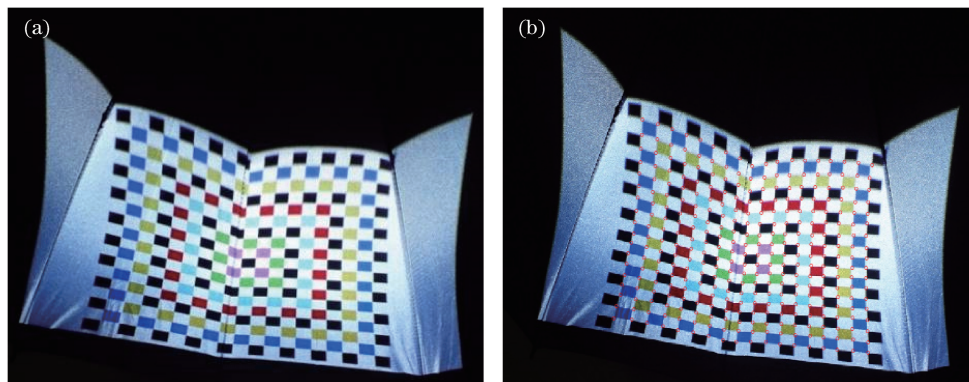


图 7 角点检测识别

Fig. 7 Detection and recognition of corners

为了进一步验证本文方法的抗噪性,通过投影仪投射彩色模式特征图像到平面标定靶标中,摄像机采集到投影仪投射的彩色特征图像,经过系统耦合性校正,得到一幅校正的彩色模式特征图像,对该彩色模式特征图像进行加噪处理,分别利用本文方法、文献[10]方法、文献[11]方法,对加噪后的彩色模式特征图像进行角点识别检测。不同算法对加噪后角点的识别正确率如图 8 所示,图中横坐标表示加噪后的彩色模式特征图像的角点行数,纵坐标表示每行角点识别个数。彩色模式特征图像每行中的角点占 18 个,由图 8 可知,本文方法具有相对更强的抗噪性。

投影仪-摄像机系统的标定过程,不仅涉及投影图像的角点识别问题,还包括投影特征图像与摄像机特征图像的匹配关系。投影仪-摄像机之间具有对极几何约束关系,利用该关系能够剔除错误的匹配角点对。利用本文方法能够有效提高匹配角点正确率。将标定靶标放置于空间不同位置,分别采集投影仪-摄像机之间的映射关系,其中位置间隔不能太大,应根据投影仪成像的画面进行抉择,利用多组标定图像对智能感知投影系统进行参数标定。分别采用本文方法、文献[10]方法、文献[11]方法对采集到的标定图像进行系统参数(f_u 、 f_v 、 u 、 v 、 k_1 、 k_2 、 k_3 、 k_4)求解,结果如表 1 所示。

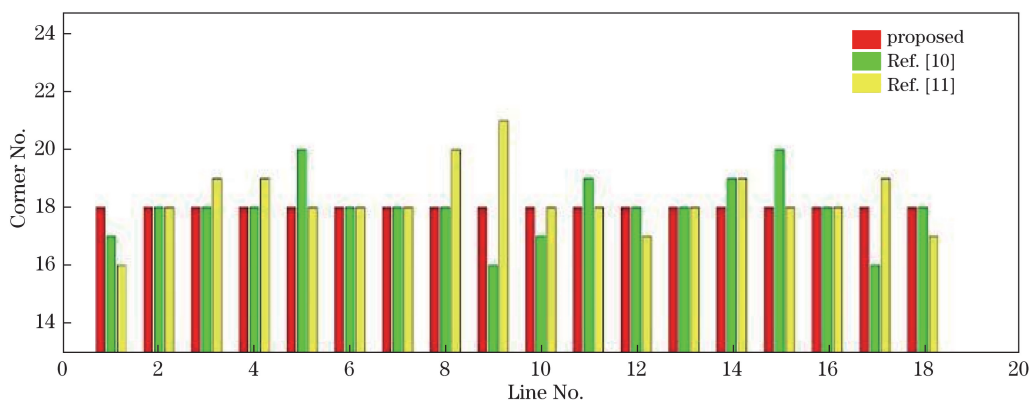


图 8 不同算法对加噪角点的检测性能

Fig. 8 Detection performance of different algorithms on corner with noise

表 1 智能感知投影系统标定结果

Table 1 Calibration results of intelligent projection system

| Equipment | Method | f_u | f_v | u | v | k_1 | k_2 | k_3 | k_4 |
|-----------|-----------|---------|---------|---------|--------|----------|----------|----------|----------|
| Camera | Ref. [10] | 3472.16 | 3568.37 | 996.04 | 758.43 | 0.08934 | -1.26736 | -0.15732 | -0.06427 |
| Projector | Ref. [10] | 1973.59 | 1978.62 | 547.38 | 824.19 | -0.03485 | 0.12681 | -0.01632 | 0.043981 |
| Camera | Ref. [11] | 3353.29 | 3601.04 | 987.16 | 684.19 | 0.09817 | -1.01462 | -0.20528 | -0.13056 |
| Projector | Ref. [11] | 1984.28 | 1990.72 | 494.17 | 842.68 | -0.02621 | 0.26433 | -0.06042 | 0.03475 |
| Camera | Proposed | 3465.52 | 3470.16 | 1023.43 | 764.52 | 0.02532 | -0.86433 | -0.06042 | -0.00197 |
| Projector | Proposed | 1968.17 | 1969.45 | 534.25 | 806.74 | -0.01172 | 0.09768 | -0.00865 | 0.024382 |

通过表 1 中得到的系统参数,可以解算投影仪、摄像机的角点的图像坐标信息值,将其与实际图像坐标信息进行比较即可得到系统的重投影误差信息,进一步处理即可得到摄像机、投影仪在横坐标方向、纵坐标方向的最大误差值 E_{maxu} 、 E_{maxv} ,标准偏差值 E_{STDu} 、 E_{STDv} ,平均误差信息值 E_{meanu} 、 E_{meanv}

(表 2)。通过表 2 可以看出,本文方法对摄像机、投影仪参数优化处理后的各个误差评价指标都小于文献[10]方法、文献[11]方法。为了能够直观地体现本文方法的标定精度,对其中一幅标定图像的角点重投影误差的分布状况进行展示,如图 9 所示,角点重投影误差基本保持在 0.25 pixel 范围内。

表 2 智能感知投影系统标定误差

Table 2 Calibration error of intelligent projection system

| Equipment | Method | E_{maxu} | E_{maxv} | E_{STDu} | E_{STDv} | E_{meanu} | E_{meanv} |
|-----------|-----------|------------|------------|------------|------------|-------------|-------------|
| Camera | Ref. [10] | 0.534 | 0.761 | 0.471 | 0.493 | 0.384 | 0.393 |
| Projector | Ref. [10] | 1.023 | 1.202 | 0.643 | 0.582 | 0.428 | 0.476 |
| Camera | Ref. [11] | 0.782 | 0.936 | 0.528 | 0.632 | 0.453 | 0.502 |
| Projector | Ref. [11] | 1.437 | 1.391 | 0.792 | 0.763 | 0.539 | 0.527 |
| Camera | Proposed | 0.338 | 0.326 | 0.274 | 0.265 | 0.192 | 0.203 |
| Projector | Proposed | 0.437 | 0.508 | 0.243 | 0.196 | 0.203 | 0.245 |

由于投影仪-摄像机具有仿人眼感知能力,因此通过利用表 1 得到的各个参数,可对标定图像进行三维信息值反算求解,即能得到标定图像在空间中的分布状况。由于标定图像在实际空间中具有平行度为 0 的特性,加之标定图像中每行角点构成的直线与每列角点构成的夹角具有垂直特性,因此可利用三维信息值反算求解得到各个角点构成的面的平

行度以及线的垂直度,利用这 2 项指标对标定精度进行验证分析。如表 3 所示,面平行度误差的最大值、最小值和平均值分别为 P_{max} 、 P_{min} 、 P_{mean} ,线垂直度误差的最大值、最小值和平均值分别为 V_{max} 、 V_{min} 、 V_{mean} ,可以看出,本文方法的面平行度、线垂直度较文献[10]方法、文献[11]方法精度高,具有较高的标定精度。

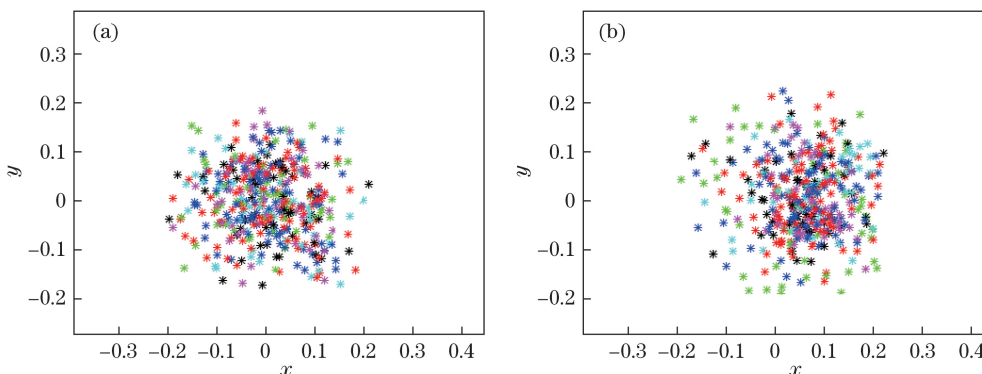


图 9 角点重投影误差。(a)摄像机;(b)投影仪

Fig. 9 Re-projection error of corner. (a) Camera; (b) projector

表 3 面平行度、线垂直度误差分析

Table 3 Error analysis of plane parallelism and line perpendicularity

| Indicator | Proposed method | Ref. [10] method | Ref. [11] method |
|--------------------------------|-----------------|------------------|------------------|
| P_{\max} | 2.63258 | 3.19224 | 3.41741 |
| P_{\min} | -2.41683 | -3.02617 | -3.37593 |
| P_{mean} | 5.04941 | 6.21841 | 6.79334 |
| $V_{\max} / (^{\circ})$ | 90.19241 | 90.31627 | 90.52715 |
| $V_{\min} / (^{\circ})$ | 89.91773 | 89.81816 | 89.72953 |
| $V_{\text{mean}} / (^{\circ})$ | 0.27468 | 0.49811 | 0.79762 |

4.3 投影畸变校正

在投影展示技术中,为了使投影仪投射图像在非规则曲面上符合人眼视觉感知一致性,增强多媒

体艺术展现感染力,需对投影画面进行几何畸变扭曲校正处理。传统投影需利用人工干预的方式进行投影图像的校正,不仅操作繁琐,而且限制了投影设备的使用灵活性^[17]。投影系统几何校正的关键之处在于建立投影仪-摄像机之间的映射关系,利用本文的角点亚像素检测算法即可建立投影仪和摄像机之间的映射匹配关系。分别在不规则曲面和规则曲面上投影,不规则曲面极易引起投影画面的不连续,导致图像畸变,而投影在规则曲面上会因投影姿态而引起投影缓慢畸变现象,如图 10(a)所示。图 10(b)为畸变校正后的投影图像,可看出,经过畸变校正,投影画面能够自适应地进行视觉一致性显示,基本上符合人眼观看的正常画面。



图 10 投影畸变校正

Fig. 10 Distortion correction of projector

5 结 论

研究了基于投影仪-摄像机硬件框架构建的智

能感知投影系统,重点分析了投影仪-摄像机的标定环节。首先,针对投影仪-摄像机色彩光子信号传输过程中面临的通道耦合性问题进行建模分析;然后,

为了提高角点识别的正确率以及抗噪性,设计了一种新型的投影彩色模式特征图像,并基于投影仪-摄像机仿人眼视觉感知中的对极几何约束原理,提出一种成像反馈式的射影几何约束优化方法。通过实验分析可知,本文方法重投影误差基本保持在 0.25 pixel 范围内。引入面平行度、线垂直度 2 个考核指标进行误差分析,结果显示,本文方法较以往算法具有更高的标定精度。投影畸变校正实验亦显示,利用本文方法进行投影校正后的画面符合人眼视觉一致性。

参 考 文 献

- [1] Majumder A, Sajadi B. Large area displays: the changing face of visualization[J]. *Computer*, 2013, 46(5): 26-33.
- [2] Sun W, Yang X, Xiao S, *et al.* Robust checkerboard recognition for efficient nonplanar geometry registration in projector-camera systems[C]. *ACM/IEEE International Workshop on Projector Camera Systems*, ACM, 2008: 504-542.
- [3] Sun B, Zhu J, Yang L, *et al.* Calibration of line-scan cameras for precision measurement[J]. *Applied Optics*, 2016, 55(25): 6836-6843.
- [4] Chen R, Xu J, Chen H, *et al.* Accurate calibration method for camera and projector in fringe patterns measurement system[J]. *Applied Optics*, 2016, 55(16): 4293-4300.
- [5] Lü Y W, Liu W, Xu X P, *et al.* A novel camera one-dimensional calibration method[J]. *Acta Optica Sinica*, 2016, 36(12): 1215005.
吕耀文, 刘维, 徐熙平, 等. 一种新的摄像机一维标定方法[J]. *光学学报*, 2016, 36(12): 1215005.
- [6] Xu H R. A note on the modulus constraint in stratified 3D reconstruction[J]. *Journal of Computer-Aided Design & Computer Graphics*, 2016, 28(2): 310-313.
许华荣. 关于分层三维重建中模约束的一点讨论[J]. *计算机辅助设计与图形学学报*, 2016, 28(2): 310-313.
- [7] Luna C A, Mazo M, Lázaro J L, *et al.* Calibration of Line-Scan Cameras[J]. *IEEE Transactions on Instrumentation & Measurement*, 2010, 59(8): 2185-2190.
- [8] Li X M, Yao J, Zhang J F. Comparison and Selection of Camera Models with Lens Distortion[J]. *Journal of Computer-Aided Design & Computer Graphics*, 2015, 27(5): 824-831.
- 李晓明, 姚剑, 张继福. 摄像机畸变模型的比较与选择[J]. *计算机辅助设计与图形学学报*, 2015, 27(5): 824-831.
- [9] Li L L, Zhao W C, Wu F, *et al.* Analysis and Improvement of characteristic points extraction algorithms in camera calibration[J]. *Acta Optica Sinica*, 2014, 34(5): 0515002.
李璐璐, 赵文川, 伍凡, 等. 摄像机标定中的特征点提取算法研究与改进[J]. *光学学报*, 2014, 34(5): 0515002.
- [10] Chen C Y, Chien H J. An incremental target-adapted strategy for active geometric calibration of projector-camera systems[J]. *Sensors*, 2013, 13(2): 2664-2681.
- [11] Chen H, Mi B X, Gao Z Q. Calibration of 3D structured light measurement system based on the properties of lens distortion[J]. *Acta Optica Sinica*, 2013, 33(12): 1215002.
陈会, 密保秀, 高志强. 基于畸变规律的三维结构光测量系统标定[J]. *光学学报*, 2013, 33(12): 1215002.
- [12] Huang S J, Xie L L, Wang Z Y, *et al.* An accurate projector calibration method by using an optical coaxial camera[J]. *Applied Optics*, 2015, 54(4): 789-795.
- [13] Xie L J, Huang S J, Zhang Z H, *et al.* Projector calibration method based on optical coaxial camera[C]. *Proceedings of SPIE*, 2014, 9301: 93012M.
- [14] Wiegardt C S, Wagner B. Hand-projector self-calibration using structured light[C]. *International Conference on Informatics in Control, Automation and Robotics*, IEEE, 2014: 85-91.
- [15] Chen X, Xi J, Jin Y, *et al.* Accurate calibration for a camera-projector measurement system based on structured light projection[J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2009, 47(3/4): 310-319.
- [16] Zhang C, Han C, Yang H M, *et al.* Large field and binocular vision calibration algorithm based on position and orientation constraints[J]. *Acta Optica Sinica*, 2016, 36(1): 0115003.
张超, 韩成, 杨华民, 等. 基于位姿约束的大视场双目视觉标定算法[J]. *光学学报*, 2016, 36(1): 0115003.
- [17] Bai B X, Yang F, Han C, *et al.* Study on irregular projection surface depth perception geometric correction[J]. *Journal of System Simulation*, 2016, 28(10): 2342-2348.
白宝兴, 杨帆, 韩成, 等. 非规则投影曲面深度感知几何校正研究[J]. *系统仿真学报*, 2016, 28(10): 2342-2348.