

基于鱼眼相机的全景显示系统几何校正方法

肖朝, 陈锋, 钟敏, 金川

成都信息工程大学光电技术学院, 四川 成都 610225

摘要 高速高精度的几何校正是构建投影显示系统的关键环节,对于由大量投影机组成的全景显示系统来说显得尤为重要。针对此,提出了基于鱼眼相机的几何校正方法并给出了理论推导。该方法首先对鱼眼相机进行标定,然后通过拍摄投影到显示墙的结构光特征条纹构建投影机与相机间的亚像素级映射关系,进而计算出每个投影通道的几何校正数据。实验结果表明:所提方法可为大规模全景显示系统提供高速高精度的解决方案,具有很好的实际应用价值。

关键词 机器视觉; 结构光投影; 全景显示系统; 鱼眼相机; 几何校正

中图分类号 O438 **文献标识码** A

doi: 10.3788/LOP54.021501

Panoramic Display System Geometric Calibration Method Based on Fisheye Camera

Xiao Chao, Chen Feng, Zhong Min, Jin Chuan

College of Optoelectronic Technology, Chengdu University of Information Technology, Chengdu, Sichuan 610225, China

Abstract The high-speed and high-accuracy geometric calibration is the key step for building projection display system, which is especially important for the panoramic display system that composed of a large number of projectors. In response to this, a geometric calibration method based on fisheye camera is proposed and its theoretical derivation is given. The proposed method firstly calibrates the fisheye camera, and then builds the sub-pixel level mapping relationship between projector and camera through capturing the structured light feature fringes on the display wall. Finally, the geometric calibration data for each projection channel is calculated. Experimental results show that the proposed method can provide a high-speed and high-accuracy solution for large-scale panoramic display system, and it has a good application value.

Key words machine vision; structured light projection; panoramic display system; fisheye camera; geometric calibration

OCIS codes 150.6910; 120.6650; 100.2650

1 引言

由多个投影机拼接组成的全景显示系统^[1]具有大视场、高分辨率、强沉浸感等特点,在虚拟现实、模拟仿真、文化娱乐等领域得到了广泛的应用。

在构建全景显示系统时,多个投影机之间画面的无缝拼接融合和亮度一致性校正是关键环节,而几何校正则是前提和基础。几何校正可以分为硬件校正^[2]和软件校正^[3-4]两种方式。硬件校正通过为每一台投影机安装具有多个调节自由度的底座并对每一自由度进行调节,来达到相邻投影画面无缝拼接的目的;软件校正又可分为不使用相机的方式^[5-6]和基于相机^[7-9]的方式,前者通常需要根据显示墙的几何结构构建投影系

收稿日期: 2016-09-07; **收到修改稿日期:** 2016-10-28

基金项目: 成都信息工程大学科研基金(KYTZ201516, KYTZ201619)、大学生创新创业训练计划(CX2015033, 201610621056)

作者简介: 肖朝(1982—),男,博士,讲师,主要从事信息光学和三维数字图像处理方面的研究。

E-mail: xiaochao@cuit.edu.cn

统的参数模型,生成映射矩阵并得到预变形画面;后者则是通过相机拍摄特征图像的方式来构建投影机与投影显示墙之间的映射关系,并利用该映射关系产生预扭曲视景画面来实现几何校正。

尽管目前已有多种几何校正方法,但这些方法大多操作繁琐,或者校正精度不高,尤其是针对大规模的全景显示系统的校正速度比较慢。本文提出了一种新的基于鱼眼相机的几何校正方法,该方法首先对鱼眼相机标定,然后拍摄投影机投射在显示墙上的结构光特征图像,通过结构光相位信息计算得到每个投影通道的几何校正数据。该方法能够提升全景显示系统的校正速度和精度,具有良好的应用前景。

2 基本原理

2.1 鱼眼相机标定

鱼眼相机^[10-11]一般指带有鱼眼镜头的相机。它的焦距很短(小于 16 mm),因此视角范围很广,能够达到甚至超出 180°。鱼眼相机能够在短距离拍摄大范围的景物,非常适用于全景显示系统的工作环境。

为了配合几何校正,需要使鱼眼相机拍摄的画面每个像素点都具有唯一的经纬度数值,这里将球面经纬度极坐标映射到相机平面上,如图 1 所示。图 1 中 φ 为经度, θ 为纬度。

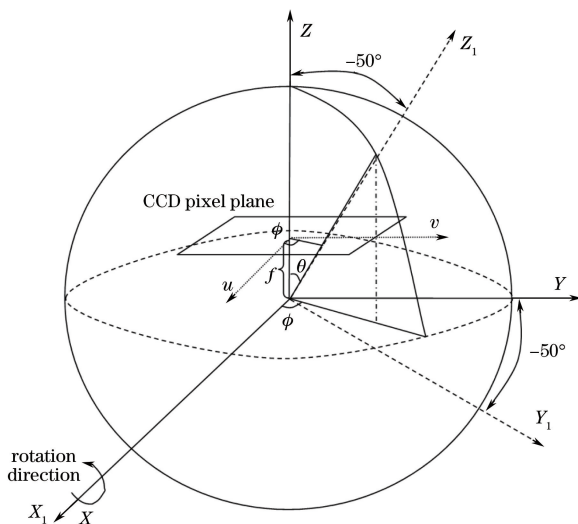


图 1 球面极坐标到相机平面的映射

Fig. 1 Mapping relation from sphere polar coordinates to camera plane

鱼镜头具有大量的畸变,要计算像点的准确位置,需要选择合适的标定模型。使用等距投影作为鱼眼相机标定模型^[12],表示为

$$r(\theta) = k_1\theta + k_2\theta^3 + k_3\theta^5 + k_4\theta^7 + \dots, \quad (1)$$

式中 r 为图像上像素点与相机系统的主点间的距离, θ 为入射光线与系统光轴的夹角, k_1, k_2, k_3, k_4 等即为标定后相机的内参数。如果标定参数和 r 已知,即可从(1)式中求解出 θ 。相机坐标系到像平面坐标系的转换公式如下

$$\begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix} = r(\theta) \begin{bmatrix} \cos(\varphi) \\ \sin(\varphi) \end{bmatrix}, \quad (2)$$

$$\varphi = \arctan\left(\frac{y}{x}\right), \quad (3)$$

$$\begin{pmatrix} u \\ v \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} m_u & 0 \\ 0 & m_v \end{bmatrix} \begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} u_0 \\ v_0 \end{pmatrix}, \quad (4)$$

式中 (u_0, v_0) 是主点, (u, v) 是像平面坐标, (x, y) 为相机坐标系坐标, (m_u, m_v) 分别为水平方向上单位距离的像素点个数和垂直方向上单位距离的像素点个数。通过上述公式,即可求得鱼眼相机上每个像素点的经纬度数值 (φ, θ) 。由于鱼眼相机的畸变较大,同时为了保证相机拍摄的径向对称性,引入径向误差项和切向误差项,可以表示为

$$\Delta_r(\theta, \varphi) = (l_1\theta + l_2\theta^3 + l_3\theta^5) \times (i_1 \cos \varphi + i_2 \sin \varphi + i_3 \cos 2\varphi + i_4 \sin 2\varphi), \quad (5)$$

$$\Delta_t(\theta, \varphi) = (m_1\theta + m_2\theta^3 + m_3\theta^5) \times (j_1 \cos \varphi + j_2 \sin \varphi + j_3 \cos 2\varphi + j_4 \sin 2\varphi), \quad (6)$$

式中 l, m, i, j 等为系数项, 将(5)式和(6)式代入(2)式中, 得到归一化后的图像平面坐标系下的转换式可以表示为

$$\begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix} = [r(\theta) + \Delta_r(\theta, \varphi)] \mathbf{u}_r(\varphi) + \Delta_t(\theta, \varphi) \mathbf{u}_t(\varphi), \quad (7)$$

式中 $\mathbf{u}_r(\varphi)$ 和 $\mathbf{u}_t(\varphi)$ 分别为径向和切向的单位矢量。

2.2 结构光投影测量

鱼眼相机标定后, 其拍摄图像有效区域上的每个像素点都具有唯一的经纬度数值。通过结构光投影测量方法构建投影机与相机间的亚像素级映射关系, 根据该映射关系即可得到每个投影机所对应的经纬度范围, 进而生成几何校正数据。

结构光投影测量方法^[13-14]具有非接触、高精度、高速度的优势, 在很多领域已得到广泛应用。通过投影机投影编码结构光条纹到显示墙上, 然后用相机拍摄被显示墙调制后的变形条纹。此外, 为了在二维相位图中精确定位, 需要垂直和水平两套结构光条纹。为了得到条纹图上每个像素点的相位值, 还需要使用相移技术生成具有固定相位差的一组标准条纹。常用的结构光相移公式为

$$\begin{cases} I_v(x, y) = \frac{M}{2} \left\{ 1 + \cos \left[\frac{2\pi x}{p} + \frac{2\pi i}{N} + \varphi(x, y) \right] \right\} \\ I_h(x, y) = \frac{M}{2} \left\{ 1 + \cos \left[\frac{2\pi y}{p} + \frac{2\pi i}{N} + \varphi(x, y) \right] \right\} \end{cases} \quad i = 0, 1, \dots, N-1, \quad (8)$$

式中 $I_v(x, y)$ 和 $I_h(x, y)$ 分别表示垂直和水平方向的结构光变形条纹光强, M 是最大灰度值, p 为条纹的周期, N 是最大相移次数, $\varphi(x, y)$ 为测量物体的真实相位。由变形条纹图可以利用下式计算得到相位值

$$\varphi_w(x, y) = -\arctan \frac{\sum_{i=0}^{N-1} I_i(x, y) \sin(2\pi i/N)}{\sum_{i=0}^{N-1} I_i(x, y) \cos(2\pi i/N)}. \quad (9)$$

由于使用了反正切计算, (9)式中得到的相位值的取值范围为 $(-\pi, +\pi)$, 称为截断相位。截断相位不能直接使用, 需要利用空间或时间相位展开方法将其进行展开得到连续相位。为了提升测量的稳定性并兼顾效率, 使用文献[15]提出的三频时间相位展开方法求解相位。三频展开法仅需三套条纹频率不同的条纹(频率为 $1, s, s^2$)做时间相位展开, 大幅缩短了测量时间, 能够在保证较高相位展开精度的同时具有较高的效率。以每组条纹进行 4 次相移为例, 进行相位展开:

$$\varphi_{u(i+1)} = \varphi_{w(i+1)} + F_{\text{INT}} \left[\frac{\varphi_{u(i)} \times (f_{i+1}/f_i) - \varphi_{w(i+1)}}{2\pi} \right] \times 2\pi, \quad (10)$$

式中 i 取值为 1 和 2, $F_{\text{INT}}[\cdot]$ 表示四舍五入取整, $\varphi_{u(\cdot)}$ 为展开后的连续相位, $\varphi_{w(\cdot)}$ 为展开前的截断相位。 f_i 和 f_{i+1} 是条纹频率。由于条纹频率为 1 的截断相位相当于已经展开的相位, 因此起始展开相位值 $\varphi_u(1) = \varphi_w(1)$ 。在整个相位展开过程中, 只需要两次计算即可。

2.3 投影机-相机映射关系

分别得到标准条纹和变形条纹的水平与垂直方向的展开相位图后, 则可用来构建投影机与相机之间的映射关系。该映射关系是通过代表投影机坐标系的标准条纹相位和代表相机坐标系的变形条纹相位来构建的。

相位展开后, 投影机坐标系上每个像素点都具有唯一的水平相位值和垂直相位值, 同时相机坐标系上有特征条纹的区域上每个像素点也具有唯一的水平相位值和垂直相位值。在投影机坐标系上, 任取一个像素点 M , 在相机坐标系上找出与点 M 的水平相位值和垂直相位值分别相等的点 N (通常为亚像素点)。由于利用三频时间相位展开法得到的是绝对相位值, 通过该相位关系一定能够建立投影机像素与相机像素的一一对应关系。如此遍历整个投影机坐标系, 即可构建投影机与相机之间的亚像素级映射关系^[16], 可以表示为

$$\varphi_p = \mathbf{M}(\varphi_c), \quad (11)$$

式中 φ_p 和 φ_c 分别表示投影机和相机坐标系上展开后的绝对相位值, \mathbf{M} 表示投影机与相机之间的映射关系矩阵。

由于每一个投影机都建立起与相机的映射关系矩阵,并且相机上每个像素点都具有唯一的经纬度数值,因此利用映射矩阵即可得到每个投影机上每个像素点所对应的唯一经纬度数据,即所有的投影机坐标系均已统一到鱼眼相机坐标系下。

2.4 几何校正数据生成

得到每个投影机像素点所对应的经纬度数值后,即可生成最终的几何校正数据。针对每个投影机,首先计算出虚拟近裁剪面的宽度 W 和高度 H :

$$W = \tan(r_c) - \tan(l_c), \quad (12)$$

$$H = \tan(t_c) - \tan(b_c), \quad (13)$$

式中 l_c, r_c, b_c, t_c 分别为该投影机所对应的最小经度值、最大经度值、最小纬度值和最大纬度值。

为了实现几何校正,使投影出的图像中每个像素点在三维空间中相对于虚拟视点的经纬度与实际测量的投影经纬度一一对应,因此必须重新生成一幅新的预失真校正图像作为投影图像来满足此对应关系。即对于生成预失真校正图像中位置为 (s, t) , 投影经纬度为 (α, β) 的像素点 P , 需要找到源图像中位置为 (s', t') , 三维空间经纬度也为 (α, β) 的像素点 P' , 然后将 P' 的值赋给 P , 从而完成预失真校正图像的生成, 可以表示为

$$s' = 0.5 + \frac{\tan(\alpha)}{W}, \quad (14)$$

$$t' = \left[\frac{\tan(\beta)}{\cos(\alpha)} - \tan(b_c) \right] / H. \quad (15)$$

根据上述步骤生成的预失真校正图像,通过投影机投射到显示墙上后便得到了无形变的显示效果,同时相邻投影机之间重叠的画面也实现了亚像素级的对准,形成了一个最终的完整连续场景。

3 实验与结果讨论

3.1 鱼眼相机标定实验

图 2~5 给出了使用圆形特征图案的鱼眼相机标定过程中的部分图像。其中圆形特征点图像使用 46 inch(116.84 cm) 平板电视进行显示。



图 2 标定时拍摄的一幅特征图像



图 3 选取特征点的范围

Fig. 2 Captured feature image when calibrating

Fig. 3 Scope selecting of feature points

图 3 中用紫色线段手动框出了需要标定的有效区域,图 4 标示出了通过重心提取后的特征识别结果,图 5 中包围图像的紫色椭圆标示出了鱼眼相机的有效图像范围,椭圆外部的区域在进行计算时可以不予考虑,从而节省计算时间。标定后的内参数为 $k_1 = 8.5957868, k_2 = -0.143151, k_3 = 72.200379, k_4 = 72.1809006, k_5 = 1390.27803, k_6 = 925.699362, k_7 = -0.170823655, k_8 = 0.048237833, k_9 = 0.012412227$ 。其中 k_1 近似为镜头的焦距, (k_5, k_6) 是主点, (k_3, k_4) 分别为水平方向上单位距离的像素点个数和垂直方向上单位距离的像素点个数, (k_2, k_7, k_8, k_9) 为镜头的畸变系数。表 1 给出了标定误差结果。



图 4 对特征点识别后的结果

Fig. 4 Results after recognition of feature points



图 5 包围图像的椭圆

Fig. 5 Ellipse surrounding the image

表 1 标定误差数据

Table 1 Data of calibration error

Type of error	Error value /pixel
Mean pixel error	0,5453
RMS pixel error	0,6186
Maximum reprojection error	2.5036×10^{-6}
Mean reprojection error	1263×10^{-7}

从表 1 中可以看出,平均像元误差和均方根(RMS)像元误差都达到了亚像素级,重投影后的误差更是小到可以忽略的程度。这是由于在进行标定时选取了其中畸变相对较小的区域,如图 3 所示。同时选择的算法就是专门针对鱼眼相机进行优化的,因此重投影误差相对较小。上述实验说明该标定方法能够较好地实现图像的畸变校正。

3.2 穹顶全景显示系统实验

以由 24 个投影机以 10+10+4 的方式由下而上分三层组成的穹顶型全景显示系统为例对提出的方法进行了实验验证。实验装置如图 6 所示,在一个三脚架上安装鱼眼相机(Canon 6D + Canon Fisheye 8~15 mm Lens),将该实验平台置于场地中心位置,将相机镜头朝向穹顶显示墙的上方并固定好。

用程序控制每个投影机依次投射结构光特征图像,并用鱼眼相机拍摄,在整个拍摄过程中要保持相机固定不动。针对每个投影通道,使用三频时间相位展开法投影条纹周期为 1、8、64 像素的垂直和水平方向的结构光条纹,并且使用了四步相移算法进行测量。因此,每个投影通道需要投影并拍摄 24 幅结构光特征图像。图 7 是其中一幅在穹顶全景显示系统中用标定好的鱼眼相机拍摄的结构光特征图像。



图 6 实验系统结构图

Fig. 6 Structure of experiment system

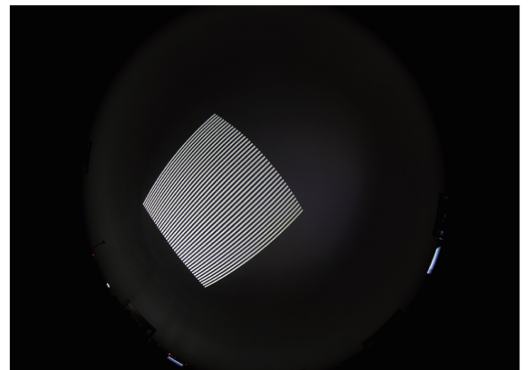


图 7 鱼眼相机拍摄的一幅特征条纹图

Fig. 7 Feature fringe image captured by fisheye camera

将拍摄的结构光特征条纹图根据三频时间相位展开法进行相位展开,然后利用相位信息构建投影机与相机间的亚像素级映射关系。由于相机坐标系下每个像素点的经纬度唯一且确定,因此可以通过插值得到投影机坐标系下每个像素点的经纬度值。然后再根据(12)~(15)式对纹理画面进行预校正变形。

3.3 性能分析

将所提出的方法与国际上校正融合领域的顶级专家 Majumder A 等^[17]提出的具有代表意义的自动校正算法进行了时间性能测试比较。其中基于鱼眼相机标定的校正系统所耗费的时间包括相机标定的时间、特征图像拍摄时间、特征图像识别及计算每个投影机上的像素点对应的经纬度值的时间。文献[17]中的校正算法所需时间包括建立与显示墙相匹配的三维结构图、拍摄特征图像、识别特征图像、自动调整投射图像以便与标准结构图重叠等过程。在穹顶全景显示系统中这两种自动校正系统所耗费的时间的比较如表 2 所示。

表 2 两种校正方法耗时比较

Table 2 Comparison of time consumption between two calibration methods

Calibration methods	Fisheye camera method	Ref.[17] method
Time consumption	About 2 h	About 3 h

图 8~10 为在穹顶全景显示系统中校正前后的部分场景。图 8~10 中的场景是使用开放式场景图(OSG)三维渲染引擎实时渲染得到的,模拟的是机场塔台管制场景。



图 8 校正前的局部场景效果

Fig. 8 Local scene effect before calibration



图 9 校正后的局部场景效果

Fig. 9 Local scene effect after calibration



图 10 飞机飞越穹顶顶部的场景

Fig. 10 Scene of plane flying over roof of dome

图 8 为未进行校正时的效果,从图 8 中可以明显看到相邻投影机产生的融合区域,图 9 为进行几何校正和亮度一致性校正后的效果。图 10 为飞机飞越穹顶顶部时的瞬间场景,此时飞机处于 4~5 个投影机的共同投影区域内,校正效果达到了视觉几乎不能分辨的程度,融合区过渡平滑,飞机在运动过程中经过相邻投影区域时没有撕裂和跳动;投影机全局亮度基本一致,达到视觉无缝的拼接效果。

4 结 论

对大规模全景显示系统中的几何校正问题进行了讨论,提出了基于鱼眼相机标定的几何校正算法。从理论上论证了算法的可行性,并用实验验证了算法的有效性,比较好地解决了在大规模全景显示系统中如何快速而高精度地完成几何校正的问题。目前该算法已经应用到具体的项目中,随着大规模投影显示系统应用的日益广泛,其发展前景也会更加广阔。

5 致谢

感谢四川大智胜软件股份有限公司提供具有 24 通道投影机的穹顶全景显示系统进行实验验证。

参 考 文 献

- [1] Xiao Chao. Research and application of parts of key techniques in large-scale panoramic display system[D]. Chengdu: Sichuan University, 2014.
肖 朝. 大规模全景显示系统若干关键技术研究与应用[D]. 成都: 四川大学, 2014.
- [2] Robert M, Yoav N. Multichannel display systems for data interpretation and command and control[C]. SPIE, 2003, 5080: 250-259.
- [3] Wang B P, You Z S, Jiang X R, *et al.* A new method of precise self-adaptive automatic exposure control for camera in intelligent transportation systems[C]. International Conference on Transportation Engineering, 2007: 1879-1884.
- [4] Yang R G, Majumder A, Brown M S. Camera based calibration techniques for seamless flexible multi-projector displays [C]. Visualization and Computer Graphics, 2005, 11(2) : 193-206.
- [5] Zhang Yanglin, Yang Hongyu, Tang Rong, *et al.* Research of geometrical calibration algorithm for distributed curved surface projection system[J]. Microcomputer Information, 2009, 25(12-13): 174-176.
张杨林, 杨红雨, 唐 荣, 等. 分布式曲面投影系统几何校正算法的研究[J]. 微计算机信息, 2009, 25(12-13): 174-176.
- [6] Liu Guohua, Yao Yingxue. Correction of projector imagery on curved surface[J]. Computer Aided Engineering, 2006, 15(2): 11-14.
刘国华, 姚英学. 投影仪曲面投影校正技术[J]. 计算机辅助工程, 2006, 15(2): 11-14.
- [7] Zhang J, Wang B P, Li X F. Geometric calibration of projector imagery on curved screen based-on subdivision mesh [C]. Advances in Geometric Modeling and Processing, 2008, 4975: 592-600.
- [8] Zhang Jun, Wang Bangping, Li Xiaofeng. An edge blending method for multi-projectors display system with anomalous overlap regions[J]. Journal of Sichuan University (Engineering Science Edition), 2010, 42(1): 149-155.
张 军, 王邦平, 李晓峰. 多投影仪显示系统异形重叠区域的边缘融合方法[J]. 四川大学学报(工程科学版), 2010, 42(1): 149-155.
- [9] Wang Xiuhui, Yang Haibo, Lin Hai. Geometry calibration for multi-projector tiled display wall [J]. Journal of Computer-Aided Design & Computer Graphics, 2008, 20(6): 707-712.
王修晖, 杨海波, 林 海. 多投影显示墙的几何校正[J]. 计算机辅助设计与图形学学报, 2008, 20(6): 707-712.
- [10] Zhu Haijiang, Xu Xiaobo, Zhou Jinglin. Fisheye image matching based on rotation matrix under spherical perspective projection[J]. Acta Optica Sinica, 2013, 33(2): 0215001.
祝海江, 徐晓波, 周靖林. 基于球面透视投影旋转矩阵的鱼眼图像匹配[J]. 光学学报, 2013, 33(2): 0215001.
- [11] Shen Xiajing, Cheng Mengjiao, Xiao Jiangjian, *et al.* Corner detection for fisheye checkerboard images based on iterative correction[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2016, 53(9): 091501.
申夏晶, 程梦娇, 肖江剑, 等. 基于迭代校正的鱼眼棋盘格图像角点检测[J]. 激光与光电子学进展, 2016, 53(9): 091501.
- [12] Juho K, Sami S B. A generic camera model and calibration method for conventional, wide-angle, and fish-eye lenses [J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2006, 28(8): 1335-1340.
- [13] Su Xianyu, Zhang Qican, Chen Wenjing. Three-dimensional imaging on structured illumination[J]. Chinese J Lasers, 2014, 41(2): 0209001.
苏显渝, 张启灿, 陈文静. 结构光三维成像技术[J]. 中国激光, 2014, 41(2): 0209001.
- [14] Ou Pan, Wang Ting, Li Ruixiang. A three-dimensional teeth measurement system based on structured light[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2016, 53(1): 011102.
欧 攀, 王 婷, 李瑞祥. 一种基于结构光的牙齿三维测量系统[J]. 激光与光电子学进展, 2016, 53(1): 011102.
- [15] Xu Zhenhua, Su Xianyu. An algorithm of temporal phase unwrapping [J]. Journal of Sichuan University (Natural Science Edition), 2008, 45(3): 537-540.
徐珍华, 苏显渝. 一种时间相位展开算法[J]. 四川大学学报(自然科学版), 2008, 45(3): 537-540.
- [16] Xiao Chao, Su Xianyu, Chen Feng, *et al.* A fusion method for multi-projector display based on fringe modulation[J]. Acta Optica Sinica, 2016, 36(4): 0412007.
肖 朝, 苏显渝, 陈 锋, 等. 基于条纹调制度的多投影显示融合方法[J]. 光学学报, 2016, 36(4): 0412007.
- [17] Majumder A, Brown M S. Practical multi-projector display design[M]. A K Peters/CRC Press, 2007.