

# 调制度测量轮廓术中高度映射与相机同时标定的方法

卢明腾<sup>1</sup> 苏显渝<sup>1</sup> 曹益平<sup>1</sup> 游志胜<sup>2</sup> 荆海龙<sup>2</sup>

<sup>1</sup>四川大学电子信息学院, 四川 成都 610065

<sup>2</sup>四川大学计算机学院, 四川 成都 610065

**摘要** 传统的调制度测量轮廓术在进行系统的标定时,需要将标准平面多次精密移动,以建立调制度与实际物理高度的映射关系,同时还要对摄像机进行单独的标定。提出一种新的用于调制度测量轮廓术系统的高度映射与相机同时标定的方法。该方法用一个含有多个台阶的标定模块代替传统的调制度测量轮廓术标定方法中使用的标准平面及复杂的平移定位系统,多个高度相同但空间离散分布的台阶构成多个虚拟校准平面,虚拟平面上的调制度分布是通过一个拟合过程实现的,同时多个台阶的中心点还可以作为立体靶标用于相机标定。这种标定方法的特点是:只需要一次扫描测量过程就可以完成系统的标定,包括建立调制度与高度的映射关系和对相机的标定。阐述了该标定方法的原理,并给出实验结果说明了该标定方法的有效性。

**关键词** 测量; 三维面形测量; 调制度测量轮廓术; 垂直测量; 高度映射; 相机标定

**中图分类号** P221 **文献标识码** A

**doi:** 10.3788/AOS201636.0612002

## A Method of Both Height Mapping and Camera Calibration at the Same Time in Modulation Measuring Profilometry

Lu Mingteng<sup>1</sup> Su Xianyu<sup>1</sup> Cao Yiping<sup>1</sup> You Zhisheng<sup>2</sup> Jing Hailong<sup>2</sup>

<sup>1</sup>College of Electronics and Information Engineering, Sichuan University, Chengdu, Sichuan 610065, China

<sup>2</sup>School of Computer Science, Sichuan University, Chengdu, Sichuan 610065, China

**Abstract** In the calibration process for traditional modulation measuring profilometry, a standard plane needs to be moved several times to establish the mapping relationship between modulation and actual physical height. And the camera calibration process needs to be done separately. A new calibration method for modulation measuring profilometry is proposed, which can implement height mapping and camera calibration at the same time. In this method, a standard block is used instead of the standard plane and the complex translation stage system in the traditional methods. Several separated stages with the same height but whose spatial distribution is discrete are used to form a virtual calibration plane, on which the modulation distribution is obtained by fitting process, and the multi-stages can also be used in the lateral coordinates calibration process. The characteristics of this method are that only one scanning process is required for setting up the mapping relationship between the modulation and height and calibrating the lateral coordinates. The theory analysis of the proposed method is given and experiment proves the feasibility of the method.

**Key words** measurement; 3D shape measurement; modulation measuring profilometry; vertical measurement; height mapping; camera calibration

**OCIS codes** 120.6650; 030.4280; 110.2960

## 1 引言

基于结构光的三维面形测量技术具有非接触、测量速度快、精度高和易于在计算机控制下自动化测量等优点,已被深入研究并被广泛用于机器视觉、自动化控制加工、工业自动检测、产品质量控制、实物仿形、生物

**收稿日期:** 2015-12-18; **收到修改稿日期:** 2016-02-24

**基金项目:** 国家自然科学基金(61177010)、国家重大科学仪器开发专项(2013YQ49087901)

**作者简介:** 卢明腾(1988—),男,博士研究生,主要从事三维测量方面的研究。E-mail: firedinosaur@163.com

**导师简介:** 曹益平(1962—),男,博士,教授,博士生导师,主要从事三维测量及光机电一体化技术等方面的研究。

E-mail: ypcao@scu.edu.cn(通信联系人)

医学、三维成像和影视特技制作等领域<sup>[1-3]</sup>。在基于三角法的结构光三维测量技术中<sup>[4-5]</sup>,有以采集数据量大、精度高等特点著称的相位测量轮廓术(PMP)<sup>[6-7]</sup>;有以单帧图像恢复物体形貌,能实现高速三维面形测量的傅里叶变换轮廓术(FTP)<sup>[8-10]</sup>。这类方法通过投影光轴与观察光轴之间的夹角,将待测物体的高度调制到投影的正弦光栅的相位信息中,通过计算条纹的变形量重建三维面形。与三角测量相对应,将投影光轴和观察光轴重合的测量方法称为“垂直测量”或“同轴测量”<sup>[11-12]</sup>。调制度测量轮廓术(MMP)采用了垂直测量原理,从而摆脱了基于三角测量原理的光学三维传感方法中阴影、遮挡等限制,可以实现表面高度变化剧烈或不连续的物体的测量<sup>[13-15]</sup>。

结构光三维测量方法中,若要得到被测物体面形的三维坐标,需要建立合适的高度映射关系同时对横向坐标进行校准。现有的校准方法可分为两种:隐式校准和显示校准。其中隐式校准常需要一个精密的平移台<sup>[16-18]</sup>,此工作台带动标准平面在结构光投影系统的测量范围内纵向移动,以建立相位或调制度与实际物理高度的映射关系。为了校准横向坐标,还需要在标准平面的已知位置上贴上一些基准标记点。显式校准方法需要预先得到测量系统的一些结构参量<sup>[19-21]</sup>,如观察系统的主点坐标、焦距、三角法的系统中投影系统中心和成像系统中心的距离、成像系统中心和参考平面的距离以及投影光轴和成像光轴之间的夹角等。而精确测量这些参数是较困难的。

最近,Min Zhong等<sup>[22]</sup>提出了一种连续相移和垂直扫描的调制度测量轮廓术,其特点是相移和垂直扫描是一个连续的和自动同步的过程。该方法测量时,通过对测量范围内的一系列等间距平面进行扫描,建立扫描过程中得到调制度最大值位置序号与实际物理空间位置的对应关系,产生查找表。再对待测物体进行扫描,得到物体上每一点的调制度最大值的扫描位置序号,然后通过之前建立的高度映射查找表恢复出物体的三维面形。

本文针对连续相移和垂直扫描的调制度测量轮廓术,提出了一种无需精密平移工作台和标准平面的隐式校准方法,高度映射和相机标定在一次测量过程中就可完成。设计了一个包含4个虚拟校准平面的标定模块,这些虚拟校准平面实际上等同于普通隐式校准方法中平移后的标准平面。每个虚拟校准平面都是由许多空间离散分布的圆形子区域组成,为了恢复虚拟平面的调制度分布,使用圆形子区域的调制度分布进行拟合。论证了该方法的可行性,给出了实验结果。实验表明:该方法只需一个标定模块和一次扫描测量过程就可以完成系统的标定,包括建立调制度扫描位置序号与高度的映射关系和对摄像机的标定,大大简化了测量系统的标定过程。

## 2 连续相移和垂直扫描垂直测量方法原理

### 2.1 基本原理

连续相移和垂直扫描调制度测量轮廓术的原理如图1所示<sup>[22]</sup>。投影光栅垂直于光轴放置于一维平移台上,平移台沿与光轴成 $\theta$ 夹角方向连续移动,实现相移和垂直扫描自动同步。扫描的过程中,平移台等间距位移量产生的触发脉冲控制电荷耦合器件(CCD)拍摄投影的光栅条纹图。位移量可分解为垂直于光轴和平行于光轴两个方向,其中垂直于光轴方向的位移当量为光栅的相移量 $2\pi/N(N\geq 3)$ 。平行于光轴方向,总的位移量确保被测范围内的每个高度面,在扫描过程中经历正离焦-对焦-负离焦的过程。如图2(a)所示,CCD拍摄的条纹图序列中,从每一个同位置像素点,可以得到其沿时间轴的条纹图,其条纹图及其调制度包络如图2(b)所示。

对于第 $i$ 时刻,CCD采集到的第 $i$ 帧图像,可以表达为

$$I(x, y, i) = \frac{R(x, y)}{M^2} [I_0(i) + C_0(x, y, i) \cos(2\pi f x + 2\pi i/N)] \quad (i = 1 \cdots T), \quad (1)$$

式中, $R(x, y)$ 为被测表面不均匀的反射率, $M$ 为系统整体的放大率, $I_0$ 与 $C_0$ 分别为背景光强及其与投影条纹的对比度, $f$ 为光栅的频率, $T$ 为一次扫描拍摄条纹图的总帧数。

由于投影光栅同时在做 $N$ 步相移,CCD拍摄的图片序列中,同一像素位置沿时间轴得到的条纹可表示为

$$I(i) = \frac{R}{M^2} [I_0(i) + C(i) \cos(\Phi_0 + 2\pi i/N)] \quad (i = 1 \cdots T), \quad (2)$$

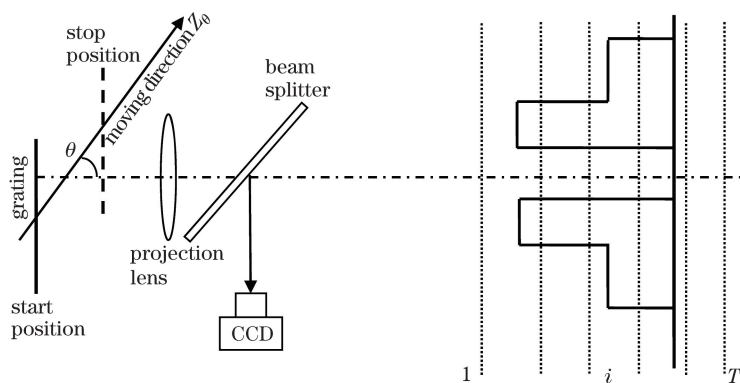


图 1 测量方法原理图

Fig. 1 Principle diagram of measuring method

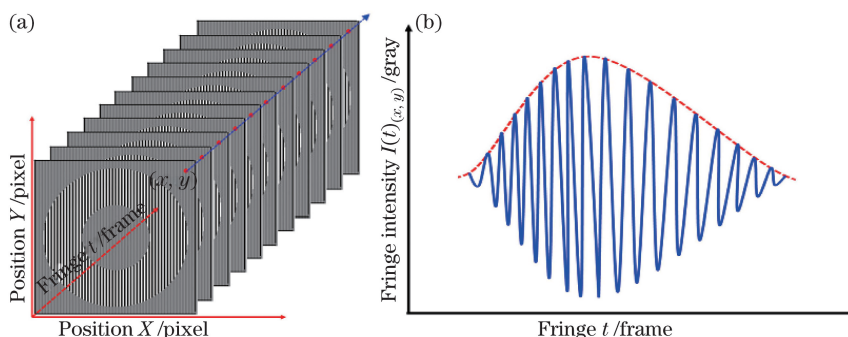


图 2 (a) 扫描拍摄的图像序列; (b) 扫描图像序列同一像素点  $(x, y)$  灰度分布

Fig. 2 (a) A series of fringe patterns captured by camera; (b) gray level distribution of a definite point  $(x, y)$  in the captured fringes

式中,  $C(i)$  为扫描条纹由于离焦引起的沿时间轴的对比度变化,  $\Phi_0$  为初始相位。

### 2.2 系统标定

一次扫描测量的过程, 每个像素点都可以得到如图 2 所示的条纹图, 其调制度包络的最大值点即反映了扫描过程中投影光栅清晰成像的位置。通过在投影像空间, 扫描测量一系列已知位置的物理平面, 建立扫描位置序号与实际物理位置的映射关系。使用该映射关系, 即可对扫描的物体, 逐点进行高度映射, 进而恢复其三维面形。

系统标定的方法如图 3 所示, 对测量范围采用了  $N$  个标定平面进行标定, 选取最远离投影系统的平面为参考平面(高度为 0 mm)。标定过程中, 顺次从位置 1 到位置  $N$  对每一个标定平面, 扫描采集 401 frame 相移条纹图。对于任意一个标定位置平面  $n$ [高度  $H(n)$ ], 在采集的序列图像的任一同位置像素点  $(x, y)$ , 都可以找到其调制度最大的图像, 该图像序号记为  $T(n)_{\max}$ 。由此, 通过二次曲线拟合, 可建立位置高度  $H(n)$  与最大调制度序号  $T(n)_{\max}$  之间的映射关系查找表。该映射关系的公式可以表示为

$$H(n) = a(x, y) + b(x, y)T(n)_{\max} + c(x, y)T^2(n)_{\max}, \quad (n = 1, 2, \dots, N), \quad (3)$$

式中,  $H(n)$  为标定平面  $n$  上像素点  $(x, y)$  所对应的实际物理高度位置;  $a(x, y)$ ,  $b(x, y)$  与  $c(x, y)$  分别为二次曲线拟合的系数;  $T(n)_{\max}$  表示第  $n$  个标定平面, 调制度最大值的扫描位置序号。对于图像的每一个像素点, 都将计算得到其唯一的拟合系数  $a(x, y)$ ,  $b(x, y)$  和  $c(x, y)$ 。得到每个像素点的  $a(x, y)$ ,  $b(x, y)$  和  $c(x, y)$  后, 即完成高度映射查找表的建立。

## 3 新的系统标定方法

基于上述测量原理, 在已有的连续相移和垂直扫描测量方法, 以及传统的调制度测量轮廓术的标定过程中, 需要一个标准平面, 在精密位移平台带动下精确位移, 并对逐个位置进行扫描测量, 以建立调制度最大值位置(或调制度值)与实际物理位置的对应关系。同时还需要对摄像机单独进行标定, 两者结合才能给出被

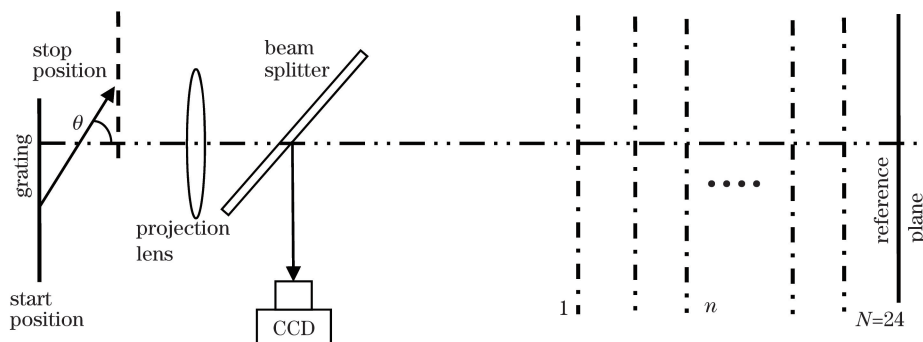


图 3 系统标定原理图

Fig. 3 Diagram of system calibration

测表面的三维坐标。

为一次性实现系统标定所需的调制度-高度映射与相机标定,设计了一个可以同时高度映射与相机标定的标定模块,如图 4(a)所示。在此标定模块的底板平面上有 9 个规则分布的子物体,其中每个子物体 [图 4(b)所示]由 4 个高度相同但半径依次变化的圆柱形台阶组成,所有同一高度的台阶面又构成了一个虚拟的平面,如图 4(a)与(b)中的 plane2,plane3,plane4 和 plane5。这 4 个虚拟平面加上底板平面就组成了建立调制度扫描位置序号与高度映射所需的 5 个校准平面。统一起见,将底板所在平面称为 plane1,并选为参考平面。此外,圆柱形台阶的中心还可以构成空间的 36 个基准点来进行相机标定,可实现高度映射和相机标定的一次性系统校准。

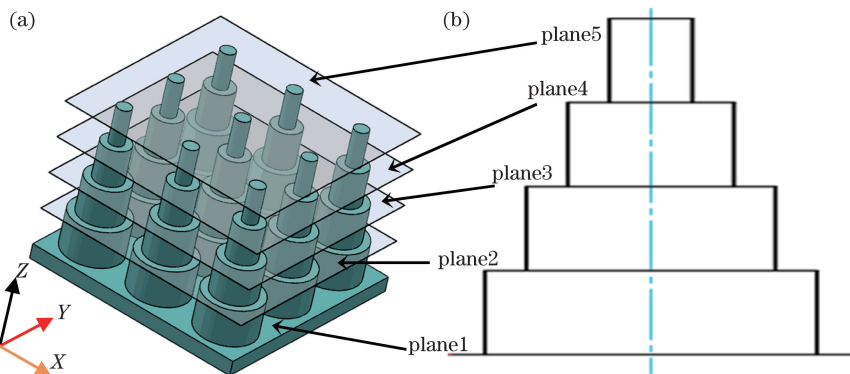


图 4 标定模块。(a)3D 模型;(b)子物体剖面图

Fig. 4 Calibration module. (a) 3D model; (b) section plot of sub-object

### 3.1 圆台子区域分割

对标定模块完成扫描测量后,为了得到每个虚拟校准平面的连续调制度扫描序号分布,需要将构成同一个校准平面的所有子区域从整个模块灰度图中分割出来。使用 Canny 算子,对 CCD 拍摄的标定模块灰度图像进行边缘提取,用于分割圆形台高度子区域。Canny 算子具有边缘检测效果好、失真小的特点。其基本处理流程是<sup>[23]</sup>:1)使用高斯滤波对图像  $I(x, y)$  进行滤波去噪处理;2)采用高斯一阶  $x$  偏导数和一阶  $y$  偏导数分别对图像做卷积得到  $I_x(x, y)$  和  $I_y(x, y)$ ;3)利用  $I_x(x, y)$  和  $I_y(x, y)$  计算图像的梯度幅值  $M(x, y)$  和梯度方向  $\theta(x, y)$

$$M(x, y) = \sqrt{I_x^2(x, y) + I_y^2(x, y)}, \quad (4)$$

$$\theta(x, y) = \arctan\left[\frac{I_y(x, y)}{I_x(x, y)}\right]; \quad (5)$$

4)采用非最大抑制处理,即判断梯度幅值图像的像素是否大于沿梯度方向上的二个相邻的像素,大于则可能是边缘点,否则删除该点;5)采用滞后阈值处理来消除虚假边缘并连接断续边缘,即使用一个高阈值  $T_h$  和经过非极大值抑制后的梯度幅值图像进行比较,记录边缘点,对所有的边缘点在邻域内迭代寻找大于低阈值  $T_l$  的点并标记为边缘点。

### 3.2 虚拟校准平面连续调制度最大值扫描序号获取

对于所有位于同一高度平面,用上述方法分割得到 9 个截断调制度最大值扫描位置序号子区域后,需要还原出其在整个虚拟校正平面上的连续分布。对于其他未测量区域的调制度最大值扫描位置序号分布,可采用二次曲面拟合的方法得到。在具体的实验中,采用了下面的多项式曲面来表示校准平面的连续调制度最大值扫描序号分布:

$$f(x, y) = \sum_{i=0}^2 \sum_{j=0}^2 a_{ij} x^i y^j \quad (6)$$

### 3.3 高度映射与相机标定

得到校准平面的调制度最大值扫描位置序号分布后,使用第 2 节介绍的方法,即可建立其与实际物理高度映射关系。为了在世界坐标系中重建三维表面,还需要对 CCD 相机进行标定,或者在针孔模型(或线性模型)下进行校准<sup>[18-19]</sup>。对于所使用的标定模块,各圆台子物体是共轴的,相邻子物体横纵间距恒定且已知,故标定模块的每个台阶中心点(如图 5 中标出的红色点)可以作为一个三维靶标(如图 5 所示)实现 CCD 相机标定。实现方法为:在 CCD 拍摄标定模块图像并提取各圆台边界后,找出各圆台台面的中心点的像素坐标,在线性模型下,建立各中心点的二维像素坐标与其在实际物理空间的变换关系

$$\begin{bmatrix} u_i \\ v_i \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} m_{11} & m_{12} & m_{13} & m_{14} \\ m_{21} & m_{22} & m_{23} & m_{24} \\ m_{31} & m_{32} & m_{33} & m_{34} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_{wi} \\ Y_{wi} \\ Z_{wi} \\ 1 \end{bmatrix}, \quad (7)$$

式中,  $(u_i, v_i, 1)$  为第  $i$  个圆台中心点的像素坐标,  $(X_{wi}, Y_{wi}, Z_{wi}, 1)$  为对应第  $i$  个圆台中心点的实际物理坐标。(7)式所包含的方程组可以转换为关于  $m_{ij}$  的方程组

$$\begin{cases} X_{wi}m_{11} + Y_{wi}m_{12} + Z_{wi}m_{13} + m_{14} - u_i X_{wi}m_{31} - u_i Y_{wi}m_{32} - u_i Z_{wi}m_{33} = u_i m_{34} \\ X_{wi}m_{21} + Y_{wi}m_{22} + Z_{wi}m_{23} + m_{24} - v_i X_{wi}m_{31} - v_i Y_{wi}m_{32} - v_i Z_{wi}m_{33} = v_i m_{34} \end{cases} \quad (8)$$

对于(8)式,若标靶上有  $n$  个特征点,则可以得到关于  $\mathbf{M}$  矩阵 12 元素的  $2n$  个线性方程,求解方程即可得到变换矩阵  $\mathbf{M}$ 。对于标定模块,4 个台阶面每个台阶 9 个圆台,共有 36 个特征点。得到  $\mathbf{M}$  矩阵后将其与相机内外参数关联可以得到

$$\begin{bmatrix} m_{11} & m_{12} & m_{13} & m_{14} \\ m_{21} & m_{22} & m_{23} & m_{24} \\ m_{31} & m_{32} & m_{33} & m_{34} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_x & 0 & u_0 & 0 \\ 0 & a_y & v_0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{r}_{3 \times 3} & \mathbf{t}_{3 \times 1} \\ 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad (9)$$

式中,  $(u_0, v_0)$  为主点坐标,  $(a_x, a_y)$  为与相机焦距相关的参数,  $\mathbf{r}$  为旋转矩阵,  $\mathbf{t}$  为平移矩阵。求解方程组即可得到内外参数矩阵。基于测量系统结构,投影与测量系统通过一个分束镜实现共光轴,使 CCD 相机以垂直视角直接观察被测物体实现垂直测量模式,在此系统结构下世界坐标系的  $Z$  轴与标定模块圆台轴线平行,测量结果直接给出被测物体三维面形在世界坐标系下的面形数值。

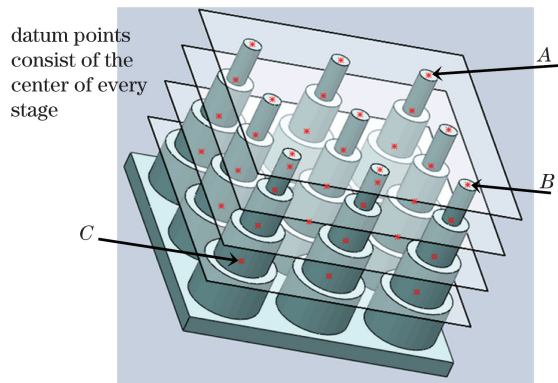


图 5 三维靶标  
Fig. 5 3D target

## 4 实验结果与分析

### 4.1 方法可行性证明实验

本方法与已有的隐式校准方法相比:1)校准平面个数减少;2)校准平面上的有效数据区域减少。为证明本方法的可行性,进行了验证实验。

1)针对校准平面个数减少的问题,实验在 115 mm 的测量范围内采用了 24 个校准平面进行标定,相邻标定面间距 5 mm。从 24 个平面中,任意选取第 1,7,13,19,24 这 5 个平面上(对应高度分别为 115,85,55,25,0 mm)的某一像素点[像素点(213,413)]的数据,按第 2 节介绍的原理拟合用于高度映射的函数。同时使用 24 个面的数据拟合高度映射函数进行对比,如图 6 所示。图中,蓝色“\*”为 24 个平面使用的数据点,蓝色实线为使用 24 点数据拟合的高度映射曲线;红色“□”为使用的 5 个平面的数据点,红色实线为使用 5 点数据拟合的高度映射曲线。从图中可以看出,红色与蓝色两条高度映射曲线几乎重合,将两条拟合曲线对应数据点相减后,差值的最大绝对值仅为 0.215,该值相对于 100~300 的实际值范围,其影响只有 1‰,说明校准面减少到 5 个面,对高度映射曲线的获取影响较小。

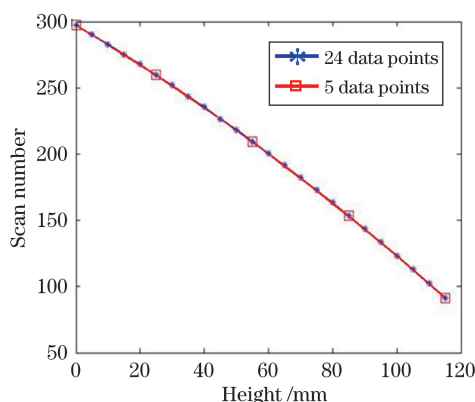


图 6 不同数据量拟合高度映射曲线对比

Fig. 6 Comparison of fitting height mapping curves by different data quantities

2)针对校准平面上的有效数据区域减少的问题,验证实验中,分别取高度为 115,55,0 mm 的校准平面,取特定数据区域以模拟标定模块的台阶面。三个高度的校准平面所取的数据区域如图 7(a1)、(a2)与(a3)所示,其中白色为选取的数据区域;三个高度平面上实际的扫描调制度最大值位置序号分布如图 7(b1)、(b2)与(b3)所示;三个高度平面上拟合的扫描调制度最大值位置序号分布如图 7(c1)、(c2)与(c3)所示。比较 b 组与 c 组图可以发现,拟合的面与实际的面几乎一致,可以代替平面实际扫描调制度最大值位置序号分布,用作高度校准。

### 4.2 实验及结果

为验证所提出的标定方法,采用一个实际的标定模块进行了标定,并对一个平面和一个实际物体进行了测量。

测量系统所使用的标定模块如图 8(a)所示。标定模块中(加工高度误差小于 0.02 mm,同心度加工偏差小于 0.01 mm)的子物体由 4 个高 25 mm 的同心圆柱台组成,从底部到顶部,每个圆柱台的直径分别为 40,30,20,10 mm,9 个子物体尺寸相同,横纵方向相邻子物体的中心距为 50 mm。圆柱台的各台阶面数据将用于拟合所在高度的校准平面,因此,圆台物体的高度即决定了标定的测量范围,所用的标定模块,可以实现对 100 mm 的被测高度范围进行标定。

拍摄圆台标定模块的灰度图,对每个圆台区域进行提取,考虑到在针孔模型或线性模型下,圆形在 CCD 面上成的像会变成一个类似鸡蛋形的椭圆,因此提取各圆台边界后根据边界像素点坐标,进行椭圆拟合:

$$ax^2 + bxy + cy^2 + dx + ey + f = 0. \quad (10)$$

根据拟合的椭圆方程可以找到该圆台区域的中心点坐标。

各圆台的边界及区域的中心如图 8(b)所示,各级台阶边缘由低到高依次用红、蓝、绿、粉红色标出其提

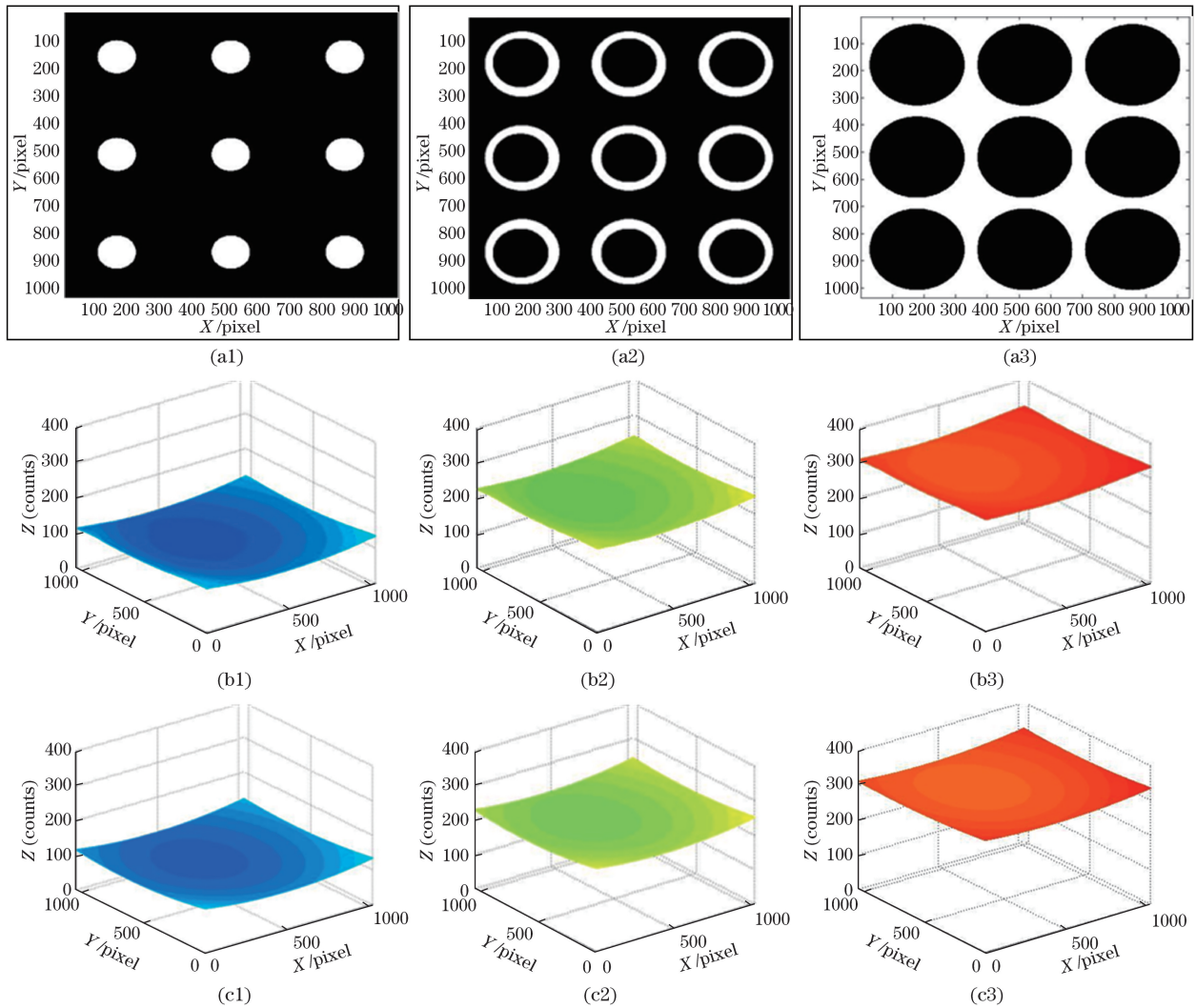


图 7 校准面拟合验证实验结果

Fig. 7 Verification experiment result of calibration plane fitting

取的区域边界及中心。标定过程中采集的其中一幅标定模块的条纹图如图 8(c) 所示。各高度台阶提取的数据区域如图 8(d1)~(d5) 所示。图 8(e) 为根据各区域数据拟合得到的扫描调制度最大值位置序号分布。图中可以看出,使用的算法实现了各个高度台阶边缘及平台区域的提取。

进一步验证拟合的各校准平面扫描调制度最大值位置序号分别在实际测量时的精度情况,测量了一个检验平面与一个方台块件物体。检验平面的设定高度为 60.00 mm,测量的平均值为 59.53 mm,标准差 0.27 mm。图 9 是检验平面的测量结果。图 9(a) 是该平面三维重建图,图 9(b) 是该平面  $x=10$  mm 行的误差放大的分布图。由图中可以看出,恢复的平面只在视场边角区域出现了较大误差,并不太影响测量视场主要区域的精度。从实验结果可以看出,检验平面的测量结果对于 100 mm 的测量范围,可以接受。相比于原有方法<sup>[22]</sup>,误差虽然略有增大,但是标定过程只需对标准件进行一次扫描测量即可完成,相比于原有需要借助精密平移台的带动扫描测量  $N$  个校准平面的方法,标定过程大大简化,无需精密平移台系统且标定所需数据量已是原来方法的  $1/N$ 。且通过提取个圆台中心点的坐标,还可同时实现  $x, y$  方向的坐标校准。

测量的实际方台物体如图 10(a) 所示,物体上 stage A、stage B 与 stage C 三个平台区域的高度分别设计为 45、55、65 mm,测量过程中的某一帧物体条纹图如图 10(b) 所示。图 10(c) 为使用本标定方法恢复的物体三维轮廓,图 10(d) 为使用原有复杂的标定方法恢复的物体三维轮廓,此次实验对 100 mm 的测量范围,使用了 11 个平面(相邻间隔 10 mm)进行标定。对比结果图 10(c) 与图 10(d) 可以看出,本标定方法可以实现对物体的三维形貌测量。两种方法测量 stage A、stage B 与 stage C 三个台阶平面恢复的高度

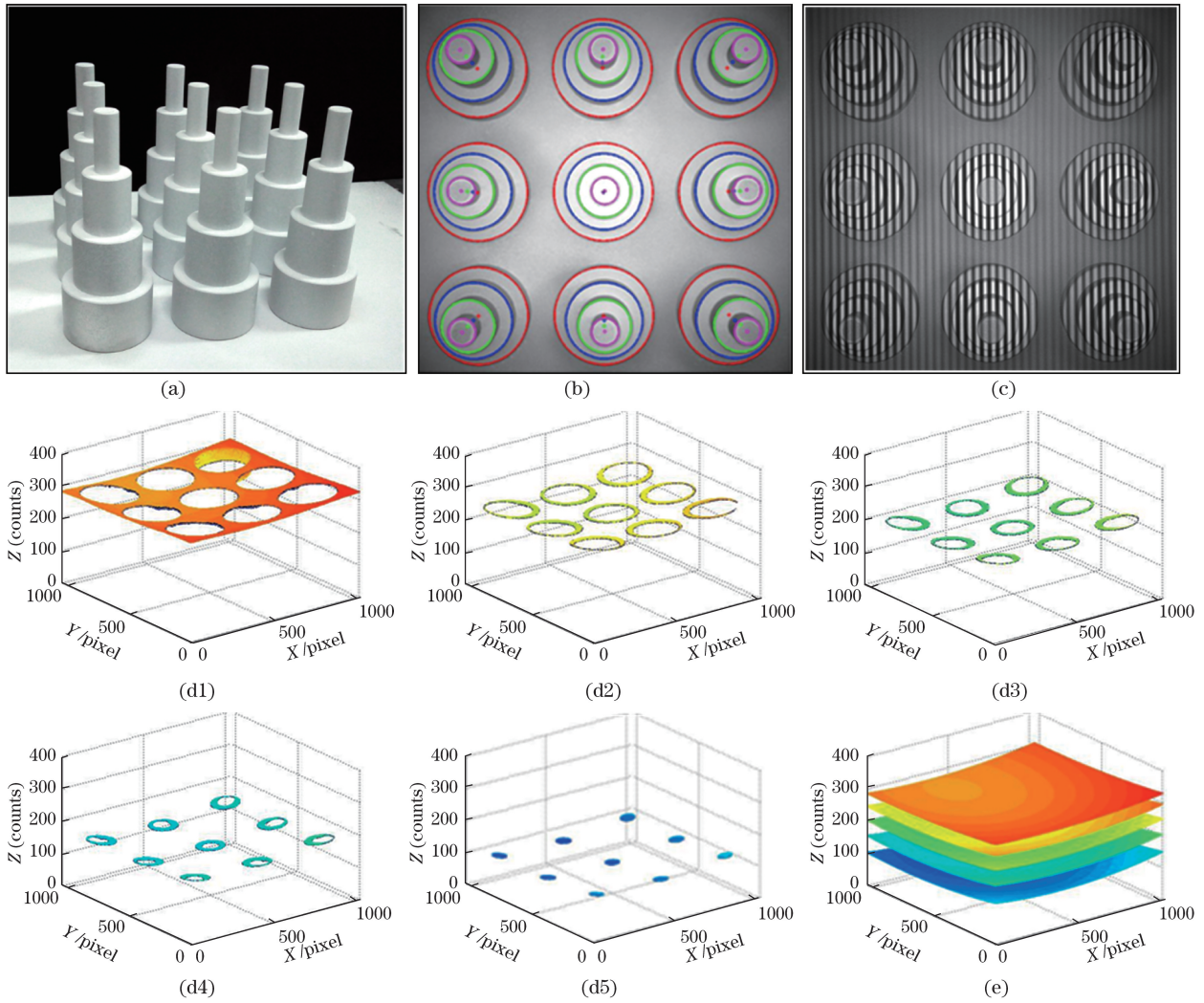


图 8 实测标准件得到校准过程

Fig. 8 Calibration process of measuring standard parts

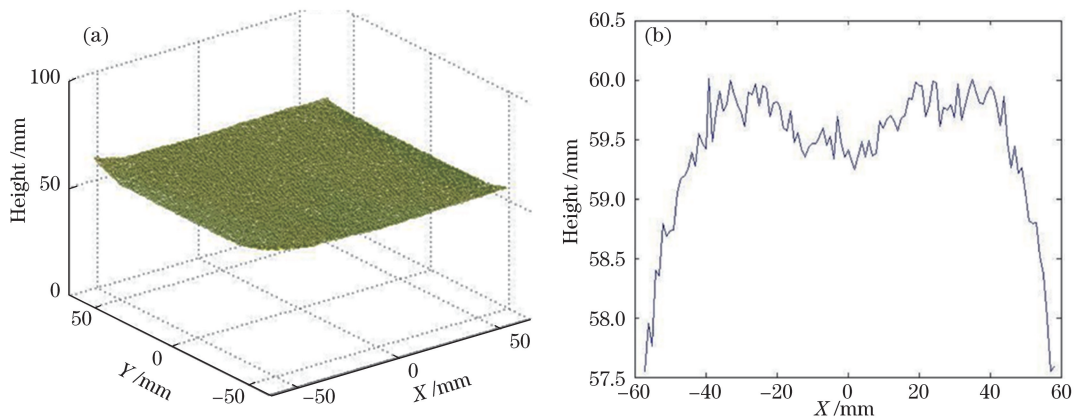


图 9 (a) 检验平面测量结果; (b)  $x=10$  mm 行的误差分布结果

Fig. 9 (a) Measurement result of testing plane; (b) error distribution for  $x=10$  mm row

及测量均方差如表 1 所示,从表中可以看出,提出的方法是可行的,且几乎已达到原有复杂的标定方法的精度水平<sup>[22]</sup>。



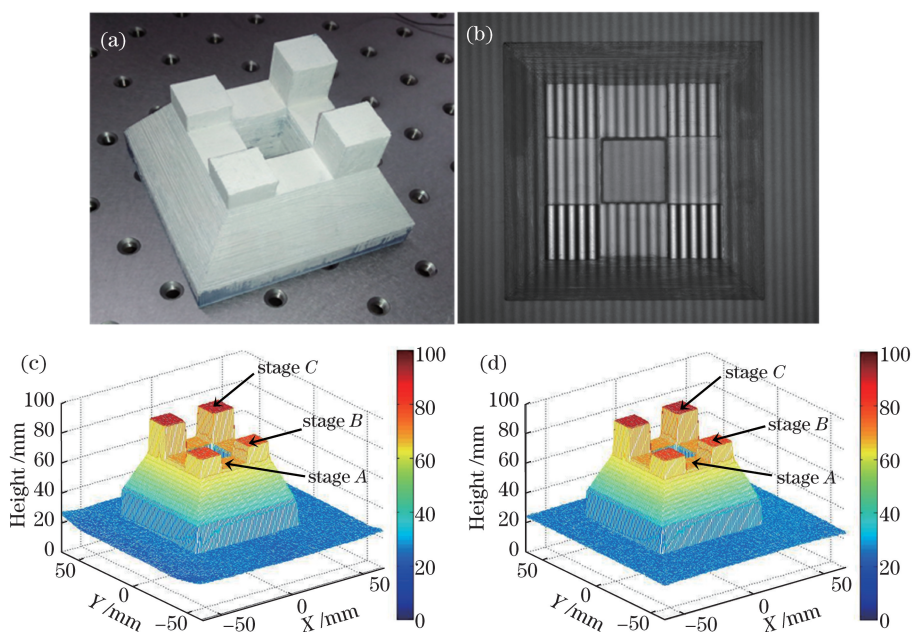


图 10 (a)待测物体图;(b)测量过程中的物体条纹图;(c)提出的方法标定后恢复的物体三维形貌;  
(d)已有的方法标定后恢复的物体三维形貌

Fig. 10 (a) Object to be measured; (b) fringe pattern during measuring process; (c) reconstructed 3D shape of object by proposed calibration method; (d) reconstructed 3D shape of object by previous calibration method

表 1 几个台阶高度及标准差

Table 1 Measured height and standard deviation of each stage height

	Proposed method		Previous method	
	Measured height /mm	Standard deviation /mm	Measured height /mm	Standard deviation /mm
Stage A	44.96	0.13	44.96	0.13
Stage B	55.19	0.15	54.85	0.12
Stage C	65.88	0.12	65.27	0.11

通过该标定模块的测量, CCD 相机的标定也已完成。相关参数计算结果如表 2 所示, 包括主点坐标  $(u_0, v_0)$ , 相机焦距  $(f_x, f_y)$ , 以及旋转、平移矩阵。用以计算以上参数的立体靶标点坐标, 所参考的世界坐标系为: 以标定模块中心圆台最底层的台阶中心为坐标原点, 以指向圆台顶端中心的方向为  $z$  轴正方向, 中心圆台底面中心指向其左边相邻圆台的底面中心为  $x$  轴正方向, 建立右手直角坐标系。所使用的 CCD 靶面尺寸为  $2/3$  inch (1 inch = 2.54 cm), 图像大小为  $1384 \text{ pixel} \times 1036 \text{ pixel}$ 。CCD 镜头焦距为 25 mm。

为了检验系统标定方法的有效性, 将标定模块上的 36 个基准点分为两组, 一组作为标定点, 一组作为检验点。如 3.3 节所述, 标定模块上共有 36 个基准点, 数据量远远超出确定转换矩阵  $\mathbf{M}$  所需, 故只使用其中 33 个点用于相机标定, 剩余 3 个点(图 5 中的点 A, B 与 C)用来检验。通过 3 点的像素坐标经转换矩阵  $\mathbf{M}$  计算后, 得到 3 点在世界坐标系的坐标, 然后可求得相应的距离, 实现标定结果和测量精度的检验。相关结果如表 3 所示, 从表中可以看出, 相机标定的方法, 已经达到了与垂直高度测量相当的精度。

表 2 相机标定结果

Table 2 Result of camera calibration

Principle point		Focal length		Rotation matrix	Transfer matrix
Unit: pixel		Unit: pixel		$\begin{bmatrix} -1.0 & 0.0059 & 0.0075 \\ 0.0035 & 1.0 & 0.0021 \\ -0.0075 & 0.0021 & -1 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} -1.61 \\ -5.18 \\ 631.2 \end{bmatrix}$
$u_0 : 525.94$	$v_0 : 563.18$	$f_x : 4210.2$	$f_y : 4199.8$		
Unit: mm		Unit: mm			
$u_0 : 3.34$	$v_0 : 3.58$	$f_x : 26.77$	$f_y : 26.76$		

表 3 相机标定结果检验实验  
Table 3 Verification result of camera calibration

Points	Theoretical distance /mm	Measured distance /mm	Error /mm
A—B	100	100.11	0.11
B—C	125	124.83	0.17
A—C	160.08	160.18	0.10

## 5 讨 论

从实验结果可以看到,所提出的方法与已有的方法相比具有以下几点优势:

1)通过对标定模块的一次扫描测量,使用各个台阶面上的数据拟合出整个标定面,即可完成原有方法中精密平移台带动标准平面扫描的复杂工作。在较小损失测量精度的情况下,大大简化了标定的过程,使该方法更适合于现场的应用。2)通过提取标定模块各个圆台的中心点,借助标定模块各子物体的实际物理位置,可以实现对相机的标定。相比于已有方法,同时实现了高度映射与相机标定的功能。

本方法也有一些局限性。通过有限台阶面上的数据拟合得到虚拟标定面的数据,与已有方法进行对比可以发现,精度略低于精密平移台带动标准平面扫描的方法,特别是在视场边角位置。

## 6 结 论

对一种连续相移和垂直扫描的调制度测量轮廓术的标定方法进行了研究,介绍了该方法的测量原理。提出一种对标定模块进行单次测量即完成对测量系统标定的方法。该方法采用一个含有多个台阶的标定模块,用多个高度相同但空间离散分布的台阶构成多个虚拟校准平面,通过拟合建立虚拟平面上的调制度分布,提取各个台阶中心建立多个空间基准点的坐标与 CCD 像素坐标的关系,用于相机标定。这种标定方法的特点是:只需要一次扫描测量过程就可以完成整个测量系统的标定。文中详细介绍了标定的原理,给出了该方法可行性验证实验结果,最终完成了系统标定和实际带孔的复杂方形台阶物体测量。实验结果显示,该方法在较少损失测量精度的情况下,可以大大简化连续相移和垂直扫描的调制度测量轮廓术的标定过程,为该方法的工程应用提供了技术支持。

## 参 考 文 献

- Geng J. Structured-light 3D surface imaging: a tutorial[J]. *Adv Opt Photon*, 2011, 3(2): 128-160.
- Su Xianyu, Zhang Qican, Chen Wenjing. Three-dimensional imaging based 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.
- Chen F, Brown G M, Song M M. Overview of three-dimensional shape measurement using optical methods[J]. *Opt Eng*, 2000, 39(1): 10-22.
- Su X Y, Von B G, Vukicevic D. Phase-stepping grating profilometry: utilization of intensity modulation analysis in complex objects evaluation[J]. *Opt Commun*, 1993, 98(1): 141-150.
- Hao Yudong, Zhao Yang, Li Dacheng. Nonlinear excess fraction method and its applications to profilometry[J]. *Acta Optica Sinica*, 1999, 19(11): 1518-1522.  
郝煜栋, 赵 洋, 李达成. 非线性小数重合法及其在轮廓测量中的应用[J]. *光学学报*, 1999, 19(11): 1518-1522.
- Srinivasan V, Liu H C, Halioua M. Automated phase-measuring profilometry of 3-D diffuse objects[J]. *Appl Opt*, 1984, 23(18): 3105-3108.
- Liu Yuankun, Olesch E, Yang Zheng, *et al.*. A one-dimensional phase-shift technique based on dual-frequency crossed fringe for phase measuring deflectometry[J]. *Chinese J Lasers*, 2015, 42(3): 0308005.  
刘元坤, Olesch E, 杨 征, 等. 基于双频正交光栅一维相移的相位测量偏折术研究[J]. *中国激光*, 2015, 42(3): 0308005.
- Takeda M, Mutoh K. Fourier transform profilometry for the automatic measurement of 3-D object shapes[J]. *Appl Opt*, 1983, 22(24): 3977-3982.
- Su X Y, Chen W J. Fourier transform profilometry: a review[J]. *Opt Laser Eng*, 2001, 35(5): 263-284.

- 10 Zhang Wangping, Lü Xiaoxu, Liu Shengde, *et al.*. Generalized phase-shifting phase retrieval approach based on time-domain fourier transform[J]. Chinese J Lasers, 2015, 42(9): 0908004.  
张望平, 吕晓旭, 刘胜德, 等. 基于时域傅里叶变换的广义相移相位恢复方法[J]. 中国激光, 2015, 42(9): 0908004.
- 11 Takeda M, Aoki T, Miyamoto Y, *et al.*. Absolute three-dimensional shape measurements using coaxial and coimage plane optical systems and fourier fringe analysis for focus detection[J]. Opt Eng, 2000, 39(1): 61-68.
- 12 Yoshizawa T, Shinoda T, Otani Y. Uniaxial rangefinder using contrast detection of a projected pattern[C]. SPIE, 2001, 4190: 115-122.
- 13 Dou Yunfu, Su Xianyu. A flexible 3D profilometry based on fringe contrast analysis[J]. Opt Laser Technol, 2012, 44(4): 844-849.
- 14 Dou Yunfu, Su Xianyu, Chen Yanfei. A fast modulation measurement profilometry[J]. Acta Optica Sinica, 2009, 29(7): 1858-1862.  
窦蕴甫, 苏显渝, 陈延非. 一种快速的调制测量轮廓术[J]. 光学学报, 2009, 29(7): 1858-1862.
- 15 Shao Shuangyun, Xu Nan. Optical three-dimensional profilometry based on modulation ratio[J]. Chinese J Lasers, 2009, 36(2): 435-438.  
邵双运, 徐楠. 基于调制比的光学三维测量轮廓术[J]. 中国激光, 2009, 36(2): 435-438.
- 16 Legarda-Sa R, Bothe T, Ju W P. Accurate procedure for the calibration of a structured light system[J]. Opt Eng, 2004, 43(2): 464-471.
- 17 Chen Hui, Mi Baoxiu, Gao Zhiqiang. 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.
- 18 Su X Y, Song W Z, Cao Y P, *et al.*. Phase-height mapping and coordinate calibration simultaneously in phase-measuring profilometry[J]. Opt Eng, 2004, 43(3): 708-712.
- 19 Sun Junhua, Liu Zhen, Zhang Guangjun, *et al.*. Camera calibration based on flexible 3D target[J]. Acta Optica Sinica, 2009, 29(12): 3433-3439.  
孙军华, 刘震, 张广军, 等. 基于柔性立体靶标的摄像机标定[J]. 光学学报, 2009, 29(12): 3433-3439.
- 20 Zhang Z Y. A flexible new technique for camera calibration[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2000, 22(11): 1330-1334.
- 21 苏显渝, 李继陶. 信息光学[M]. 北京: 科学出版社, 2013.
- 22 Zhong M, Su X Y, Chen W J, *et al.*. Modulation measuring profilometry with auto-synchronous phase shifting and vertical scanning[J]. Opt Express, 2014, 22(26): 31620-31634.
- 23 Wang Neng, Zhao Hongli, Ju Shenggen, *et al.*. An improved adaptive Canny edge detection algorithm[J]. Journal of Sichuan University: Natural Science Edition, 2014, 51(3): 479-482.  
王能, 赵红立, 琚生根, 等. 一种改进的 Canny 边缘检测自适应算法[J]. 四川大学学报: 自然科学版, 2014, 51(3): 479-482.