

基于一般成像模型的微小物体测量系统标定方法

孔玮琦^{1,2} 刘京南^{1,2} 达飞鹏^{1,2*} 饶立^{1,2}

¹东南大学自动化学院, 江苏 南京 210096

²复杂工程系统测量与控制教育部重点实验室, 江苏 南京 210096

摘要 通过利用光栅投影三维测量技术进行微小物体的三维重构,提出了基于一般成像模型的标定方法,利用标定板围绕固定轴转动的不同姿态进行标定并进行优化。所提出的标定算法既解决了一般成像模型变量多的问题,又不需要借助精密位移装置,简化了整个标定过程。与此同时,利用自卷积盲去模糊的方法解决远心镜头景深小带来的离焦,提高了摄像机的标定精度。标定和三维重构实验验证了该方法的可行性和准确性。在 $23.7\text{ mm}\times 17.78\text{ mm}$ 相机视场范围下系统测量精度达到了 $6\text{ }\mu\text{m}$ 。

关键词 测量; 一般成像模型; 光栅投影; 标定; 自卷积

中图分类号 TP391.4 **文献标识码** A

doi: 10.3788/AOS201636.0912003

Calibration Method Based on General Imaging Model for Micro-Object Measurement System

Kong Weiqi^{1,2} Liu Jingnan^{1,2} Da Feipeng^{1,2} Rao Li^{1,2}

¹*School of Automation, Southeast University, Nanjing, Jiangsu 210096, China*

²*Key Laboratory of Measurement and Control of Complex Systems of Engineering, Ministry of Education, Nanjing, Jiangsu 210096, China*

Abstract The calibration method based on general imaging model is proposed by using the grating projection three-dimensional measuring technology for three-dimensional reconstruction of small objects. Different poses of the calibration target rotating around the fixed axis are utilized to calibration and optimization. The proposed calibration method solves the problems of general imaging model variables and does not need to use precision displacement device. In the meanwhile, a self-convolution blind deblurring method is used to solve the defocus caused by small depth of field of the telecentric lens, and improves the calibration accuracy of camera. The feasibility and veracity of the proposed method are demonstrated with experiments of calibration and three-dimensional reconstruction. The measurement accuracy achieves $6\text{ }\mu\text{m}$ when the camera field of view is $23.7\text{ mm}\times 17.78\text{ mm}$.

Key words measurement; general imaging model; fringe protection; calibration; self-convolution

OCIS codes 120.5050; 120.3940; 110.6880; 150.1488

1 引 言

随着科技的发展,人们日常生活中的各种产品都在向着轻便的方向发展,产品体积越来越小,微小物体的测量变得愈来愈重要,影响着工业技术的发展^[1]。近年来国内对微小物体测量的研究发展迅速,其中大量的非接触式测量方式被采用,如三角法、莫尔条纹法,微观光栅投影。李晓天等^[2]根据激光三角法设计了一套采用旋转平台的单目物体形貌测量系统。王娜等^[3]提出在单目下移动精密垂直仪器使物体多层聚焦成像进行三维重建。黄柳等^[4]开发了一种基于光切原理的现场视觉检测系统,能够用于生产现场。刘斌等^[5]研

收稿日期: 2016-05-11; **收到修改稿日期:** 2016-05-30

基金项目: 国家自然科学基金(61405034,51475092)、高等学校博士学科点专项科研基金(20130092110027)

作者简介: 孔玮琦(1992—),女,硕士研究生,主要从事三维测量及图像处理方面的研究。E-mail: wqkseu@163.com

导师简介: 刘京南(1955—),男,博士,教授,主要从事电子技术、检测技术及自动化仪表与装置等方面的研究。

E-mail: liujn@seu.edu.cn

* **通信联系人.** E-mail: dafp@seu.edu.cn

制了基于线结构光的微小直径高精度测量系统。刘奕等^[6]利用目前的研究热点体视显微镜进行三维重建。但是这些方法或是对仪器操作要求较高或是精度不高。而光栅投影测量对背景、对比度、噪声的变化不敏感,测量对象规模范围广,因此近年来得到广泛的应用^[7-9]。由于小物体的光栅投影测量系统视场和景深较小,而且相较于传统的针孔摄像机,远心镜头又具有高分辨率、几乎零失真、增加自由度和恒定的放大率等无可比拟的优势,所以本文采用远心镜头来进行三维测量。

对于光学测量系统来说,标定是测量前最重要的步骤^[10-11]。与针孔相机的透视投影不同,带有远心镜头的相机实现的是仿射投影。所以已有的很多针孔相机的标定方法都不能用来标定仿射相机。目前有很多关于仿射相机的标定方法已被提出^[12-15]。Haskamp 等^[12]直接针对仿射模型使用非线性优化的方法来估计相机参数,但是随机地选择初始参数在实际实验中可能并不能准确获得全局最小值。Li 等^[13]提出一种参数化的方法标定远心镜头,但是该方法在标定前需要知道相机传感器的像素尺寸。最近 Li 等^[14]提出增加一个长工作距离镜头的投影仪来完成远心镜头的标定,但同时增加了标定过程的复杂度和硬件成本。Grossberg 等^[16]针对各种镜头提出了一般成像模型,Ramalingam 等^[17]在此基础上对一般成像模型的标定方法进行了完善,并给出了具体的公式和计算过程^[18-19]。Yin 等^[20-21]提出了利用一般成像模型来标定测量系统并获得了较好的三维形貌。但是该方法利用了位移台设备,增加了系统的硬件成本,而且利用位移台移动的距离信息也会造成一定的误差。

本文提出了基于一般成像模型的光栅投影测量微小物体的方法。一般成像模型是一种灵活的可以应用于多种相机设备的模型,但是参数多、计算过程繁琐,对一般成像模型进行改进,通过控制标定板的旋转姿态来减少所求模型参数,并且使设备尽量简单、易于实现,同时又摆脱了依靠位移台获取精密位移距离的限制。并且实验实现了高精度的三维重构。

2 原 理

2.1 一般成像模型的标定方法

一般成像模型把成像系统看作是一个黑箱,每束入射光都分别被黑箱中每个感光元件吸收,于是获取的图像中每一个像素点都有一条入射的光线相对应,找到图像每一个像素所对应的入射光线,就可以通过黑箱连接物点与像点。假设图像上一像素点为 m_c ,其对应的光线为 l_c ,那么对于任意一个成像系统都可用图 1 描述。

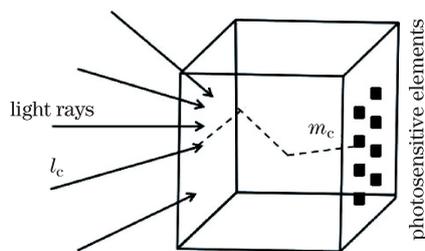


图 1 成像系统的黑箱模型

Fig. 1 Black box of imaging system

对于上述成像模型,找到图像上每个像素坐标对应的入射光线,即确定了空间物体表面某一点的三维几何位置与其在图像中对应点之间的相互关系,则完成标定。

将标定板摆出 n 个不同的姿态,标定板每个姿态下建立的坐标系称为标定板坐标系^[20],标定板坐标系建立原则如图 2(a)所示,即以标定板的左上角为原点建立 X 、 Y 、 Z 世界坐标。则对于标定板 n 个姿态,图像上像素 m_c 在标定板上对应点的齐次坐标为 $Q^i = (Q^i_1, Q^i_2, 0, 1)^T, i = 1, 2, \dots, n$ 。图 2(b)展示了标定板在空间中的任意三个姿态平面,直线 l_c 穿过三个平面,其中 Q^1, Q^2, Q^3 为直线与三个标定板平面的交点,即为像素点 m_c 在三个标定板上的对应点。

将第一个标定板坐标系作为世界坐标系,则其他标定板坐标系与世界坐标系之间的转换关系可以用旋转矩阵 R 和平移矩阵 T 来表述,即可将每个标定板坐标系上的点转化到同一世界坐标系,如图 2(b)中的 Q^2 和 Q^3 可通过(1)式转化到以第一个姿态建立的世界坐标系下,

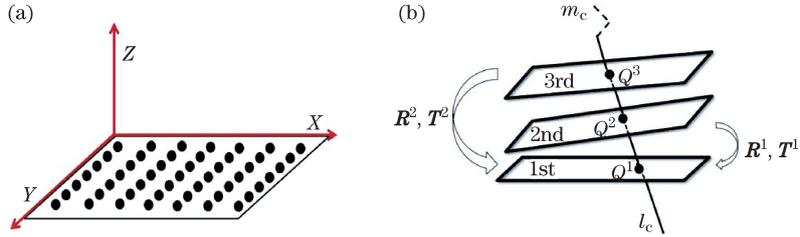


图 2 标定示意图。(a) 标定板坐标系；(b) 标定板任意位置图

Fig. 2 Schematic of calibration. (a) Coordinate of calibration target; (b) random poses of calibration target

$$\begin{pmatrix} \mathbf{R}^{i-1} & \mathbf{T}^{i-1} \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} Q_1^i \\ Q_2^i \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix}, i = 2, 3, \quad (1)$$

式中 \mathbf{R}^{i-1} 、 \mathbf{T}^{i-1} 具体表示为

$$\mathbf{R}^{i-1} = \begin{bmatrix} r_{11}^{i-1} & r_{12}^{i-1} & r_{13}^{i-1} \\ r_{21}^{i-1} & r_{22}^{i-1} & r_{23}^{i-1} \\ r_{31}^{i-1} & r_{32}^{i-1} & r_{33}^{i-1} \end{bmatrix}, \mathbf{T}^{i-1} = \begin{bmatrix} t_1^{i-1} \\ t_2^{i-1} \\ t_3^{i-1} \end{bmatrix}. \quad (2)$$

对于图像上同一个像素坐标在不同姿态的标定板上对应的世界坐标存在共线性的限制,即这些点的世界坐标都在同一条直线上。用像素点 m_c 对应的空间坐标可构成矩阵,

$$\mathbf{M} = \begin{pmatrix} Q_1^1 & r_{11}^1 Q_1^2 + r_{12}^1 Q_2^2 + t_1^1 & \cdots \\ Q_2^1 & r_{21}^1 Q_1^2 + r_{22}^1 Q_2^2 + t_2^1 & \cdots \\ 0 & r_{31}^1 Q_1^2 + r_{32}^1 Q_2^2 + t_3^1 & \cdots \\ 1 & 1 & 1 \end{pmatrix}. \quad (3)$$

空间坐标的共线性暗含了 $4 \times n$ 维的 \mathbf{M} 矩阵的秩小于 3, 即其 3×3 的子行列式为零, 由此可以建立这些空间坐标满足的等式。由于第三行暗含了平面信息^[19], 所以第三行必须保留。假设利用标定板的第一个和第二个姿态来建立系统, 则有

$$\mathbf{A}_{3jv, 12g} = 0, \quad (4)$$

式中 $\mathbf{A}_{3jv, 12g}$ 表示取矩阵 \mathbf{M} 第 3、 j 、 v 行, 第 1、2、 g 列的子行列式。将 $\mathbf{A}_{3jv, 12g}$ 整理合并可以重新组合得到关于标定板坐标 Q 和 \mathbf{RT} 的方程, 其中 \mathbf{RT} 组成的单项式构成了方程的未知量, Q 组成的单项式构成了方程的系数。用 C_i 来表示位置参数, 即 \mathbf{RT} 组成的未知量单项式, 用 $K_{3jv, 12g}$ ($\{j, v\} \in \{1, 2, 4\}, g = 3, \dots, n$) 来表示 Q 组成的系数单项式。则等式可以进一步表示为

$$\sum C_i K_{3jv, 12g} = 0. \quad (5)$$

由于像素点对应的标定板坐标系上的坐标信息可以确定, 即 $K_{3jv, 12g}$ 已知, 通过(5)式解得 C_i 从而获得 \mathbf{RT} 的信息。具体的计算过程参考文献[19], 可以发现由于旋转平移矩阵的未知量太多而导致该方法计算过程繁琐、计算量大, 所以可通过提出在摆放标定板位置时, 控制标定板只在某一方向上旋转的方法来减少旋转矩阵中的变量, 从而简化计算过程, 并通过优化算法来完善整个标定算法。

如图 3 所示, 用相机获取标定板的三个姿态。通过一个简易的可升降旋转台, 如图 3(a)所示, 可以保证放置在旋转台上的标定板第二和第三个姿态均只在 Y 轴方向上发生旋转。则图 2(b)标定板的位置变为如图 3(b)所示。

以任意一个平面建立世界坐标系, 选取在第一个姿态上建立世界坐标系, 以此为基础, 对应于某一像素点 m_c , 可以得到三个同一光线上的点

$$\mathbf{Q}_{w1} = \begin{pmatrix} Q_1^1 \\ Q_2^1 \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix}, \mathbf{Q}_{w2} = \begin{pmatrix} \mathbf{R}^1 & \mathbf{T}^1 \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} Q_1^2 \\ Q_2^2 \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix}, \mathbf{Q}_{w3} = \begin{pmatrix} \mathbf{R}^2 & \mathbf{T}^2 \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} Q_1^3 \\ Q_2^3 \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix}, \quad (6)$$

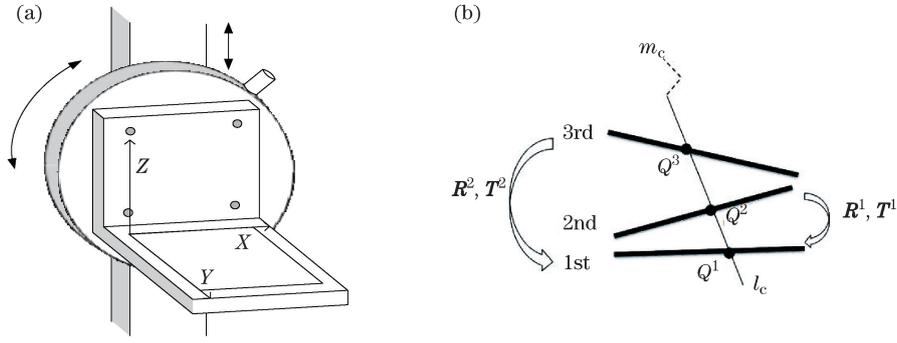


图 3 标定装置。(a)旋转台;(b)标定板位置

Fig. 3 Device for calibration. (a) Rotating stage; (b) location of calibration target

式中 $\mathbf{R}^1, \mathbf{R}^2$ 分别是第二个平面和第三个平面到第一个平面的旋转矩阵。 $\mathbf{T}^1, \mathbf{T}^2$ 分别是第二个平面和第三个平面到第一个平面的平移矩阵。

旋转矩阵 \mathbf{R} 包含了三个自由分量,分别是倾斜角 γ 、偏离角 β 和旋转角 α ,其几何意义是围绕 X 轴、 Y 轴、 Z 轴旋转的角度。旋转矩阵 \mathbf{R} 的表达式为

$$\mathbf{R} = \begin{bmatrix} \cos \alpha \cos \beta & \sin \alpha \cos \beta & -\sin \beta \\ -\sin \alpha \cos \gamma + \cos \alpha \sin \beta \sin \gamma & \cos \alpha \cos \gamma + \sin \alpha \sin \beta \sin \gamma & \cos \beta \sin \gamma \\ \sin \alpha \sin \gamma + \cos \alpha \sin \beta \cos \gamma & -\cos \alpha \sin \gamma + \sin \alpha \sin \beta \cos \gamma & \cos \beta \cos \gamma \end{bmatrix}, \quad (7)$$

由于标定板只在 Y 轴方向上发生了旋转,根据(7)式可以得到

$$\mathbf{R}^1 = \begin{bmatrix} r_1^1 & 0 & -r_2^1 \\ 0 & 1 & 0 \\ r_2^1 & 0 & r_1^1 \end{bmatrix}, \mathbf{R}^2 = \begin{bmatrix} r_1^2 & 0 & -r_2^2 \\ 0 & 1 & 0 \\ r_2^2 & 0 & r_1^2 \end{bmatrix}. \quad (8)$$

将(8)式表示的 $\mathbf{R}^1, \mathbf{R}^2$ 代入(3)式可以得到矩阵

$$\mathbf{M} = \begin{bmatrix} Q_1^1 & r_1^1 Q_1^2 + t_1^1 & r_1^2 Q_1^3 + t_1^2 \\ Q_2^1 & Q_2^2 + t_2^1 & Q_2^3 + t_2^2 \\ 0 & r_2^1 Q_1^2 + t_3^1 & r_2^2 Q_1^3 + t_3^2 \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix}. \quad (9)$$

对于矩阵 \mathbf{M} ,所有的 3×3 子行列式都为零。而由前面所述,第三行必须保留,所以共有三个子行列式可以利用,整理公式后可得到

$$\sum_{i=1}^{11} C_i K_i^\lambda = 0, \lambda = 1, 2, 4, \quad (10)$$

式中 λ 表示构造子矩阵时消除的行, C_i 表示位置参数, K_i^λ 表示相应的系数。代表的具体含义如表 1 所示。

表 1 位置参数及其相应系数

Table 1 Position parameters and corresponding coefficients

i	C_i	K_i^1	K_i^2	K_i^4
1	r_2^1	$Q_2^1 Q_1^2 - Q_1^1 Q_2^2$	$Q_1^1 Q_1^2$	$-Q_1^1 Q_1^2 Q_2^3$
2	r_2^2	$Q_2^2 Q_1^3 - Q_2^1 Q_1^2$	$-Q_1^1 Q_1^3$	$Q_1^1 Q_2^3 Q_1^3$
3	t_3^1	$Q_2^1 - Q_2^3$	Q_1^1	$Q_1^1 Q_2^2$
4	t_3^2	$Q_2^2 - Q_2^1$	Q_1^1	$-Q_1^1 Q_2^2$
5	$r_2^2 t_2^1$	Q_1^3	0	$Q_1^1 Q_1^3$
6	$r_2^1 t_2^2$	$-Q_1^2$	0	$-Q_1^1 Q_1^2$
7	$t_2^1 t_3^2 - t_3^1 t_2^2$	1	0	Q_1^1
8	$r_1^1 r_2^2 - r_2^1 r_1^2$	0	$Q_1^2 Q_1^3$	$Q_2^1 Q_1^2 Q_1^3 - Q_2^2 Q_1^2 Q_1^3$
9	$r_1^1 t_3^2 - r_2^1 t_3^1$	0	Q_1^2	$-Q_2^1 Q_1^2$
10	$r_1^2 t_3^1 - r_2^2 t_3^2$	0	$-Q_1^3$	$Q_2^1 Q_1^3$
11	$t_1^1 t_3^2 - t_3^1 t_1^2$	0	1	$-Q_2^1$

只要将移动参数 \mathbf{RT} 求解出来,就可以计算出相机中每个像素对应的射线。而由于 C_i 包含了位置信息即移动参数 \mathbf{RT} ,所以为了求解出 $\mathbf{R}^1, \mathbf{R}^2, \mathbf{T}^1, \mathbf{T}^2$,需求解 C_i 。根据(10)式,用最小二乘法可以求得 C_i 的最小二乘解。假设估计的最小二乘解为 C'_i ,则其与表 1 中的实际 C_i 存在一个未知的缩放系数 k :

$$kC'_i = C_i, i = 1, \dots, 11. \quad (11)$$

根据表 1 的信息,可以得到

$$\begin{cases} r_2^1 = kC'_1 \\ r_2^2 = kC'_2 \\ t_3^1 = kC'_3 \\ t_3^2 = kC'_4 \\ r_2^2 t_2^1 = kC'_5 \\ r_2^1 t_2^2 = kC'_6 \end{cases}, \begin{cases} t_2^1 t_3^2 - t_3^1 t_2^2 = kC'_7 \\ r_1^1 r_2^2 - r_2^1 r_1^2 = kC'_8 \\ r_1^1 t_3^2 - r_2^1 t_1^2 = kC'_9 \\ r_1^2 t_3^1 - r_2^2 t_1^1 = kC'_{10} \\ t_1^1 t_3^2 - t_3^1 t_1^2 = kC'_{11} \end{cases}. \quad (12)$$

为了计算出 \mathbf{RT} 和 k ,充分利用旋转矩阵 \mathbf{R} 是单位正交阵的特性:

$$\begin{cases} r_1^2 + r_2^2 = 1 \\ r_1^2 + r_2^2 = 1 \end{cases}, \quad (13)$$

具体的计算过程为

- 1) 计算 $t_2^1 = \frac{kC'_5}{kC'_2} = \frac{C'_5}{C'_2}$, $t_2^2 = \frac{kC'_6}{kC'_1} = \frac{C'_6}{C'_1}$;
- 2) 已知 $r_i^1 = \cos \beta_i$, 所以 $r_1^1, r_2^1 \geq 0$, $r_1^1 = \sqrt{[1 - (kC'_1)^2]}$, $r_2^1 = \sqrt{[1 - (kC'_2)^2]}$, 代入 $r_1^1 r_2^2 - r_2^1 r_1^2 = kC'_8$, 可以计算出 k, r_1^1, r_2^1 ;
- 3) 将 k 代入 $r_2^2 = kC'_2, r_2^1 = kC'_1, t_3^1 = kC'_3, t_3^2 = kC'_4$, 计算出 $r_2^2, r_2^1, t_3^1, t_3^2$;
- 4) 将 r_1^1, r_2^1, t_3^2 代入 $r_1^1 t_3^2 - r_2^1 t_1^2 = kC'_9$, 计算出 t_1^2 ;
- 5) 将 r_2^2, r_2^1, t_3^1 代入 $r_1^2 t_3^1 - r_2^2 t_1^1 = kC'_{10}$, 计算出 t_1^1 。

计算出所有的移动参数即旋转矩阵和平移矩阵,代入(6)式,求得世界坐标系上的三点 Q_{w1}, Q_{w2}, Q_{w3} , 根据空间中的三点,通过直线拟合获取像素点 m_c 对应的射线 l_c 。

2.2 参数优化

在上述标定过程中不可避免地存在一定的误差,在完成相机的标定后,根据得到的第一幅标定板上任意圆心点的像素坐标 O_i^c 对应的直线 l_i^c 和 $Z=0$ 平面的交点可以重新求得第一幅标定板上圆心的世界坐标 \hat{p} , 可描述为

$$\begin{cases} l_i^c \\ Z=0 \end{cases} \Rightarrow \hat{p}. \quad (14)$$

l_i^c 的计算过程可以描述为

$$l_i^c = f(\mathbf{R}^{j-1}, \mathbf{T}^{j-1}, O_{ij}^c). \quad (15)$$

将获得的参数 \mathbf{RT} 作为初始值对标定结果进行优化。结合(14)、(15)式,则可以通过求取最小值进行优化:

$$\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n \|p_i - \hat{p}(\mathbf{R}^{j-1}, \mathbf{T}^{j-1}, O_{ij}^c)\|^2, \quad (16)$$

式中 n 为摆放标定板的姿态数, m 为标定板上所取的圆心点数。 p_i 代表第一个姿态下设定的第 i 个圆心的世界坐标, O_{ij}^c 表示第 j 个姿态下第 i 个圆心在相机上的像素坐标, $\mathbf{R}^{j-1}, \mathbf{T}^{j-1}$ 分别表示第 j 个姿态到第一个姿态的旋转矩阵和平移矩阵。 $\hat{p}(\mathbf{R}^{j-1}, \mathbf{T}^{j-1}, O_{ij}^c)$ 表示第 i 个圆心像素点对应的拟合光线和 Z 轴零平面的交点即反求得到的第一个姿态下圆心的世界坐标。由于求解(16)式的最小值是一个非线性问题,所以采用列文伯格-马夸尔特(LM)算法进行求解,从而获得优化后的位移参数。

2.3 系统标定

微小物体三维测量系统由相机和投影仪组成的,整个系统结构图为

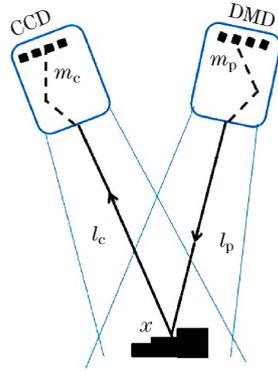


图 4 一般成像模型系统

Fig. 4 General imaging model system

与相机一样,对于上述系统同样需要对投影仪进行标定^[22]。为了标定投影仪,需在标定板投影一组正弦横纵条纹图和二值条纹图来获取标定板的垂直相位 φ_v 和水平相位 φ_h 。通过匹配横纵相位,即可建立相机与投影仪的对应关系从而获取投影仪的圆心点信息。

从相机获取的二维图片中定位出标定板上圆心坐标 O_i^c ,采用八步相移法和格雷码的方法^[23]得到 O_i^c 的垂直相位 φ_v 和水平相位 φ_h ,根据线性插值法得到投影仪上相应的点 O_i^p 的像素坐标 (u_i^p, v_i^p) :

$$u_i^p = \frac{\varphi_h(O_i^c)}{2\pi T_h} \times W, v_i^p = \frac{\varphi_v(O_i^c)}{2\pi T_v} \times H, \quad (17)$$

式中 T_h 、 T_v 分别是水平和垂直条纹光栅的周期数, W 和 H 是条纹光栅图的宽和高。通过上述的方法,得到投影仪对应的标定板的图像。

在微小物体三维测量系统中,投影仪在获得圆心点 O_i^p 后标定方法与相机一样。于是可以得到

$$\begin{cases} m_c \leftrightarrow l_c \\ m_p \leftrightarrow l_p \end{cases} \Rightarrow x = l_c \cap l_p, \quad (18)$$

根据像素点在相机和投影仪标定中分别得到的光线求取交点 x 即可得到该像素点在世界坐标系中对应的三维数据。

2.4 标定板圆心的提取

一般来说,标定板上的圆心提取都是用椭圆拟合的方法,能否准确地定位圆心也决定着标定的精度,因此准确地提取圆心是标定过程中非常重要的一步。但是对于远心镜头来说,景深通常在零点几毫米到几毫米之间,因此在标定过程中移动标定板很容易使拍得的图片部分处于离焦状态,如图 5(a)所示。模糊的图像质量会影响椭圆拟合进而影响圆心的准确提取。因此,通过采取自卷积的算法对获取的图片进行去模糊处理。盲去模糊方法已经被证实对于存在离焦模糊的图片有效^[24],该方法快速而且稳健性高。图 5(b)是用自卷积盲去模糊方法获得的图像。由图 5 可知,去模糊后圆的边界变得更清晰。

图 5(b)和由于散焦造成的模糊图 5(a)相比,圆的边缘更清晰也就能够更可靠地获得。需要强调的是,对于标定板的光栅条纹图,不能进行去模糊处理以防丢失相位信息。综上所述,整个三维重构过程为

- 1) 对获取的图像进行去模糊并通过椭圆拟合获取圆心的像素坐标。
- 2) 通过圆心的像素坐标和对应的标定板坐标系下的坐标获取每幅图像的单应性矩阵,选取图像上固定的像素坐标根据单应性矩阵得到同一像素点在三个姿态下相应的标定板坐标系下的坐标。
- 3) 根据 2.1 所述,以标定板姿态一下的平面坐标为世界坐标系,求取第二、第三个姿态到第一个姿态下的旋转平移矩阵 RT 。
- 4) 根据原理 2.2 所述,将步骤 3 中得到的 RT 矩阵作为初值代入(16)式进行 LM 算法优化,得到最终的旋转平移矩阵。

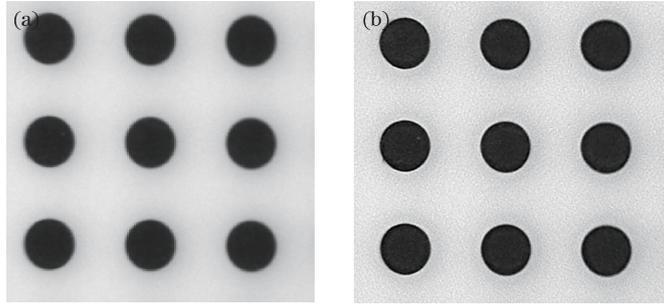


图 5 盲去模糊方法。(a)去模糊前;(b)去模糊后

Fig. 5 Blind deblurring method. (a) Before deblurring; (b) after deblurring

5) 将得到的旋转平移矩阵代入(6)式求取同一世界坐标系下每个像素点对应的射线上的点并拟合得到所在直线的方程 l_c , 即完成相机标定。

6) 通过八步相移法和格雷码方法得到标定板的相位, 根据(17)式将相机获取的圆心坐标匹配到投影仪圆心坐标, 用2)~5)相同的方法获取投影仪下的旋转平移矩阵和投影仪的图像上每个像素对应的直线 l_p 。

7) 标定好相机和投影仪之后片求取 l_c 和 l_p 的交点就可以获取物体的三维坐标。

3 系统装置和实验

3.1 系统装置

测量系统的仿射相机是由 $1628 \text{ pixel} \times 1236 \text{ pixel}$ 分辨率的相机 DH-SV2001FC 和放大倍率为 0.3 的远心镜头 MML03-HR110-5M 组成。相机的视场范围为 $23.7 \text{ mm} \times 17.78 \text{ mm}$, 景深范围为 7 mm , 足以测量微小 3D 物体的深度。镜头工作距离为 110 mm 。小视场的投影是通过 LightCrafter Pro4500 实现的, 分辨率为 $912 \text{ pixel} \times 1140 \text{ pixel}$ 。标定板是一个由 7×7 白色圆形阵列均匀分布的陶瓷平板。邻近两个圆的距离为 3.2 mm 。图 6 为微小物体测量系统实物示意图。

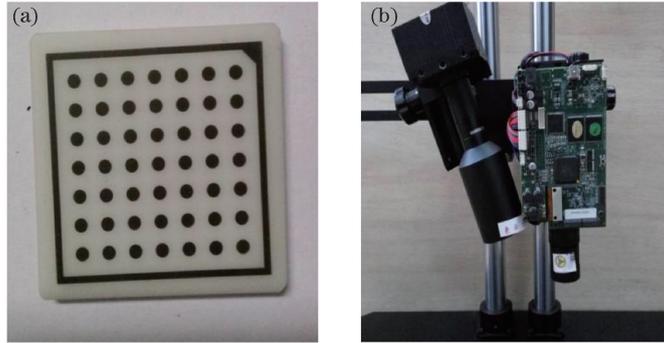


图 6 系统实物图。(a)标定板;(b)远心光栅投影测量系统

Fig. 6 Illustration of system. (a) Calibration target; (b) telecentric grating projection measuring system

3.2 标定实验

将标定板摆放在相机和投影仪远心镜头的工作距离内, 用相机获取一组标定板及标定板的光栅图, 将标定板向某一方向移动并沿着 Y 轴方向转动两次, 获取相应的两组图像。将第 1 幅标定板上的圆心点作为点 Q^1 , Q^1 的世界坐标是已知的, 通过椭圆拟合的方法同时可以获取圆心点的像素坐标 (m_u, m_v) , 对于同一个像素点 m 在第二、第三幅标定板上对应的 Q^2, Q^3 不在已知的圆心了。每幅标定板上圆心的标定板坐标是已知的, 像素坐标可以通过椭圆拟合获取, 利用圆心的标定板坐标和像素坐标可以估算出每幅图的单应性矩阵 H^i 。根据(19)式可以计算出同一像素点 m 对应的标定板坐标 Q^2, Q^3 ,

$$(Q_1^i, Q_2^i, 1)^T = H^i (m_u, m_v, 1)^T. \quad (19)$$

由上述过程,可以得到计算像素点 m 对应射线 l_c 所需要的点 Q_c^1, Q_c^2, Q_c^3 。得到的坐标数据如图 7 所示。根据 (17) 式可以得到投影仪对应的三幅标定板的圆心坐标,与上述过程相同,也可以计算出像素点 m 对应射线 l_p 所需要的点 Q_p^1, Q_p^2, Q_p^3 。

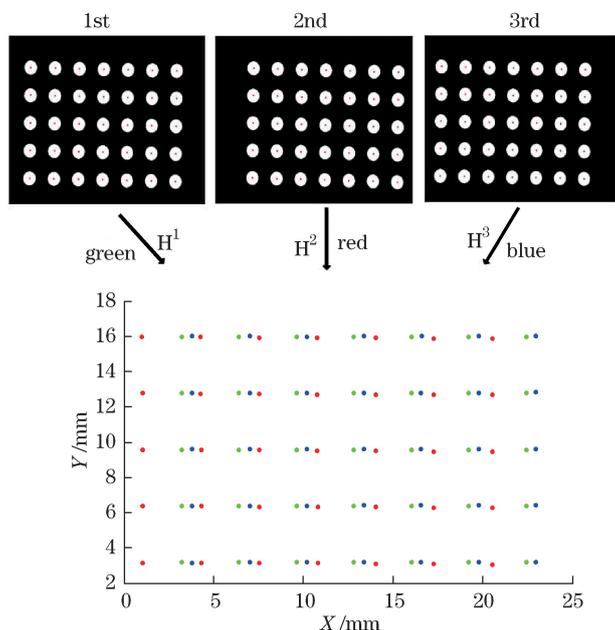


图 7 第一幅标定板的圆心点对应的 Q^i 坐标

Fig. 7 Q^i coordinate corresponding to centre point of the first calibration target

图 7 显示的是根据 (19) 式计算出的第一幅标定板的圆心点的像素坐标分别在第一、二、三幅标定板上对应的点 Q^1, Q^2, Q^3 , 绿色代表 Q^1 , 红色代表 Q^2 , 蓝色代表 Q^3 。

根据原理 2 以及上述得到的数据可以计算相机获取的第二、三幅标定板分别到第一幅标定板的旋转矩阵和平移矩阵 R^1, R^2, T^1, T^2 , 将其作为初值代入 (16) 式进行优化。

实验过程中将优化后反求得到的标定板上的圆心点坐标与实际值作了比较, 坐标在 X, Y 轴上的误差分布如图 8 所示。

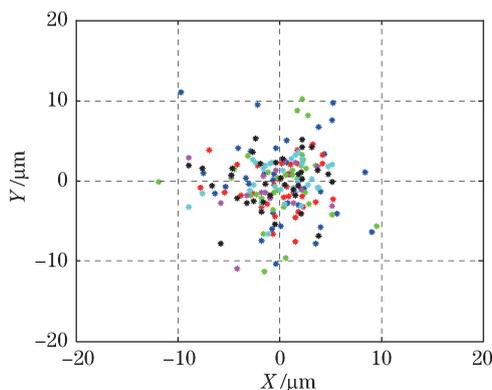


图 8 优化后圆心点的反求误差

Fig. 8 Reverse error of centre point after optimization

图 8 中不同颜色表示不同标定板上获得的圆心点误差。由图 8 可知, 优化后标定误差基本控制在了 $\pm 10 \mu\text{m}$ 内, 绝大部分在 $\pm 5 \mu\text{m}$ 内, 误差数据围绕 $(0, 0)$ 点分布。表明实验获得了较高的标定精度。

优化后最终可以得到相机获取的标定板的姿态二、三分别到姿态一的旋转矩阵和平移矩阵 R^1, R^2, T^1, T^2 为

$$\left\{ \begin{array}{l} \mathbf{R}^1 = \begin{bmatrix} 0.9925 & 0 & -0.1218 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0.1218 & 0 & 0.9925 \end{bmatrix} \\ \mathbf{T}^1 = \begin{bmatrix} 1.4001 \\ 0.1012 \\ 1.0423 \end{bmatrix} \\ \mathbf{R}^2 = \begin{bmatrix} 0.9975 & 0 & 0.0697 \\ 0 & 1 & 0 \\ -0.0697 & 0 & 0.9975 \end{bmatrix} \\ \mathbf{T}^2 = \begin{bmatrix} -1.7568 \\ 0.1420 \\ 4.8972 \end{bmatrix} \end{array} \right. \quad (20)$$

根据(20)式结果可以得到每个像素对应的入射光线,结果如图9所示。

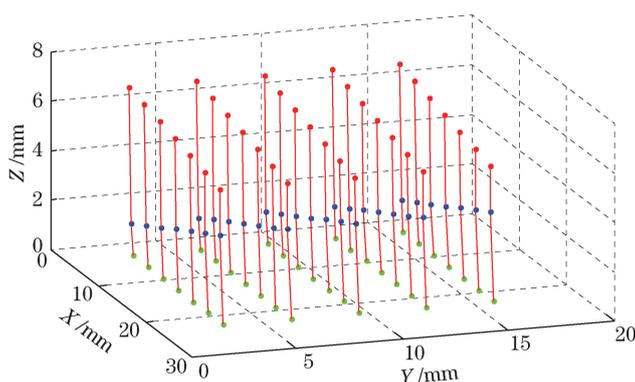


图9 相机标定结果

Fig. 9 Result of camera calibration

图9中红蓝绿三种颜色分别代表第一幅标定板上圆心点的像素坐标在三幅不同标定板上对应的世界坐标点,每条直线代表第一幅标定板上每个圆心像素点对应的入射光线。图9表明,根据上述标定方法可拟合出每个圆心点像素坐标相应的光线,为图9中35条直线,每条直线经过标定过程中求取的每个圆心点像素坐标对应的不同位置的世界坐标点。该实验结果证明了上述标定方法的可行性。

3.3 三维重构

为了测试本文方法的三维重构效果,进行了两组实验。在前面的实验中,选取第一幅标定板的圆心点作为选定的像素点计算对应的射线,因此在得到数据后可以逆向重构出第一幅标定板的圆心点。在第一组三维重构实验中,借助高精度的位移台装置,将标定板在Z轴上移动已知的距离,重构出圆心点,比较两次测得的距离和实际的距离。实验过程中,将标定板沿Z轴移动已知距离80 μm,移动5次,每次求取标定板上5×7个圆心实际移动的距离并计算其移动的平均距离和均方根误差(RMS)。测量结果如表2所示。

表2 位移ΔZ的测量结果

Table 2 Measurement results of the displacements ΔZ

Measured translation distance / μm							Mean distance / μm	RMS error / μm	Mean RMS error / μm
87	86	78	84	74	77	75	81.2	5.7	
72	85	87	90	85	75	88	83.7	6.2	
83	71	72	68	78	84	76	75.4	7.6	6.16
84	88	76	74	86	81	84	82.2	4.5	
87	79	75	78	69	83	76	79.3	6.8	

表2中实测平移距离展示了任意选取的其中7个圆心点的平移距离,平均移动距离和均方根误差均由5×7个圆心移动的距离计算所得,平均误差为5次均方根误差的平均值。从表2可以看出,圆心点在Z轴

平移距离在 $80\ \mu\text{m}$ 上下浮动,但是仅根据高度的平均值作为评价指标容易出现误判,如部分点的高度远小于 $80\ \mu\text{m}$,而另一部分远大于 $80\ \mu\text{m}$,求解得到的平均高度仍有可能在 $80\ \mu\text{m}$ 左右,而此时系统显然是有较大误差的。因此用位移前后圆心点的距离均方根误差作为系统评价精度指标。由表 2 可知,本文方法的平均测量精度大概在 $6.16\ \mu\text{m}$ 左右。

使用上述三维测量的方法,对带有复杂表面形貌的微小物体进行了三维重构,实验结果如图 10 所示,图 10(a)为所拍得的实物图。实验中向梅花五角硬币表面投射光栅条纹和格雷码条纹以获得相位信息,如图 10(b)所示,为相机获取的其中三幅相移条纹图和三幅编码条纹图。图 10(c)为图 10(a)中硬币上红色区域的三维点云细节图,图 10(d)显示的是对硬币进行三维重构最终获得的三维点云,可以看到测量系统成功重构出了硬币的三维数据。梅花五角硬币已知外沿厚度为 $1.65\ \text{mm}$,由图 10(d)三维重构结果测得该硬币厚度为 $1.645\ \text{mm}$,在上述误差范围内。

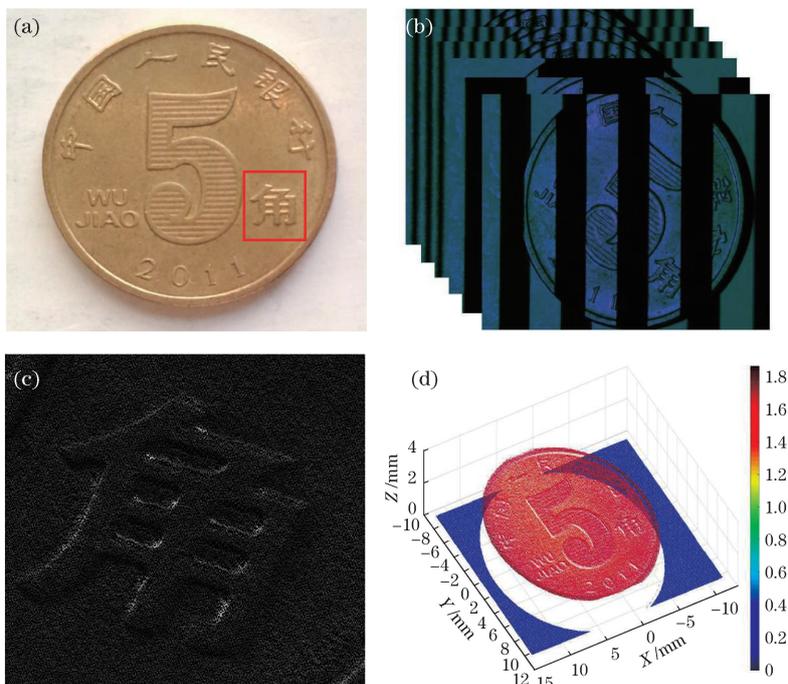


图 10 三维重构实验结果。(a)实物图;(b)相移条纹图和编码条纹图;(c)硬币的三维点云细节图;(d)硬币的三维点云
Fig. 10 Results of 3D reconstruction experiment. (a) Picture of actual coin; (b) phase-shifting fringe pattern and encoded fringe pattern; (c) three-dimensional point cloud details of the coin;
(d) three-dimensional point cloud of the coin

表 2 和图 10 均表明系统能够实现高精度的三维重构,也验证了本文方法的可行性和准确性。

4 分析与讨论

上述实验结果表明本文提出的基于一般成像模型的标定方法可以实现微小物体的三维重构,并且绝对精度能达到 $6\ \mu\text{m}$ 左右。本文方法的优点在于只需通过标定板的三个姿态就可以实现远心镜头的标定,而且相较于改进前的一般成像模型^[17]计算过程简单。与 Yin 等^[20-21]的方法相比,在标定过程中装置较为简单,不需要精密位移台的精确位移信息,降低了硬件成本的同时避免了位移信息带来的误差。

当然本文方法也存在一定的缺点。本文方法对标定板的三个姿态有一定的要求,标定板是绕某一固定轴旋转,这就使得标定过程与传统一般成像模型相比灵活性有所降低,而且旋转装置本身就会带来一定的误差,主要体现在标定板可能并不是完全只在某一方向上发生旋转,而本文方法假定 X 轴和 Z 轴方向旋转为零进行计算,所得的旋转矩阵存在了一个误差,导致用来获取直线的世界坐标点可能存在一个很小的误差值,影响了求取像素对应的空间直线从而影响测量精度。同其他使用精密位移装置的方法一样^[20-21],该误差是难以克服的系统随机误差,但实验结果表明,该微小的误差不会对三维重构结果造成显著影响,整体系统

的测量精度在预期范围内。由于本文方法只取了标定板的三个姿态,与取标定板多姿态相比虽然简化了数学模型,但是牺牲了一定的精度。而且本文方法中增加了一个优化算法,在提高测量精度的同时使得标定算法的复杂度有所增加。尽管本文方法存在上述缺点,但是从整体来看该方法在简化传统方法的同时达到高精度测量又比其他改进方法^[20-21]更具灵活性。

综上所述,所改进的基于一般成像模型的标定方法虽然还存在一定的缺点,但在微小三维测量中仍具有一定的优势。值得一提的是,该三维测量系统的视场范围在 $23.7 \text{ mm} \times 17.78 \text{ mm}$,如果更换一个放大倍数更大的远心镜头,本文方法可以对尺寸更小的物体进行三维测量。

5 结 论

在微小物体测量系统中,由于远心镜头成像原理与传统相机的针孔模型不同,所以提出利用改进的一般成像模型的方法进行标定和三维重构。所提出的方法对一般成像模型进行简化以及优化,克服了其变量太多,过程繁琐的缺点。在所提出的方法中通过一块标定板的三个姿态就可以很容易地实现标定和三维重构。同时,通过自卷积盲去模糊的方法对相机获得的标定板图像进行处理,解决了由于远心镜头景深小图像可能出现离焦的问题。实验清晰地表明采用光栅投影实现了微小物体的三维重构,并且绝对精度达到了 $6 \mu\text{m}$,证实了本文方法的可行性和有效性。

参 考 文 献

- Guo Tao, Da Feipeng, Fang Xu. Camera calibration under small field of view[J]. Chinese J Lasers, 2012, 39(8): 0808001.
郭 涛, 达飞鹏, 方 旭. 小视场环境下的摄像机标定[J]. 中国激光, 2012, 39(8): 0808001.
- Li Xiaotian, Zhang Tieqiang, Zhang Shengyong, *et al.* Small size measurement and 3D reconstruction system based on laser triangulation[J]. Optical Instruments, 2008, 30(6): 21-26.
李晓天, 张铁强, 张胜勇, 等. 基于激光三角法的小物体尺寸测量及三维重构系统[J]. 光学仪器, 2008, 30(6): 21-26.
- Wang Na, Zhou Quan. Three dimensional reconstruction of micro objects under optical microscope[J]. Opto-Electronic Engineering, 2010, 37(11): 84-90.
王 娜, 周 权. 光学显微镜下微小物体的三维重构[J]. 光电工程, 2010, 37(11): 84-90.
- Huang Liu, Yu Guiying, Zheng Yingjun. Research on the local measurement system of micro depth dimension[J]. Optical Technique, 2011, 37(5): 556-561.
黄 柳, 余桂英, 郑颖君. 微小深度尺寸现场测量系统的研究[J]. 光学技术, 2011, 37(5): 556-561.
- Liu Bin, Shen Kang, Wei Zhaochao, *et al.* Micro diameter high precision measurement system based on line structured light vision technology[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2014(z2).
刘 斌, 沈 康, 魏兆超, 等. 基于线结构光视觉技术的微小直径高精度测量系统[J]. 仪器仪表学报, 2014(z2).
- Liu Yi, Yu Mei, Cui Li, *et al.* Three dimensional reconstruction of small objects based on digital stereo microscope[J]. Journal of Ningbo University: Natural Science & Engineering Edition, 2015, 28(2): 42-47.
刘 奕, 郁 梅, 崔 力, 等. 基于数码体视显微镜的微小物体三维重建[J]. 宁波大学学报: 理工版, 2015, 28(2): 42-47.
- Su Xianyu, Zhang Qican, Chen Wenjing. 3D 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.
- Lü Jiangzhao, Da Feipeng, Zheng Dongliang. Projector defocusing profilometry based on sierra lite dithering algorithm[J]. Acta Optica Sinica, 2014, 34(3): 0312004.
吕江昭, 达飞鹏, 郑东亮. 基于 Sierra Lite 抖动算法的散焦投影光栅测量[J]. 光学学报, 2014, 34(3): 0312004.
- An Dong, Gai Shaoyan, Da Feipeng. A new model of three-dimensional shape measurement system based on fringe projection[J]. Acta Optica Sinica, 2014, 34(5): 0512004.
安 冬, 盖绍彦, 达飞鹏. 一种新的基于条纹投影的三维轮廓测量系统模型[J]. 光学学报, 2014, 34(5): 0512004.
- Wang Huifeng, Wang Bingjian. Camera radial distortion calibration of moving target[J]. Acta Optica Sinica, 2012, 32(5): 0512007.
王会峰, 王炳健. 移动特征靶标的摄像机径向畸变标定[J]. 光学学报, 2012, 32(5): 0512007.

- 11 Chen Hui, Mi Baoxiu, Gao Zhiqiang. Calibration of three dimensional structured light measurement systems based on distortion law[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 Haskamp K, Kästner M, Reithmeier E. Accurate calibration of a fringe projection system by considering telecentricity [C]. SPIE, 2011, 8082: 80821B.
- 13 Li D, Tian J. An accurate calibration method for a camera with telecentric lenses[J]. Optics and Lasers in Engineering, 2013, 51(5): 538-541.
- 14 Li B, Zhang S. Flexible calibration method for microscopic structured light system using telecentric lens[J]. Optics Express, 2015, 23(20): 25795-25803.
- 15 Chen Z, Liao H, Zhang X. Telecentric stereo micro-vision system: Calibration method and experiments[J]. Optics and Lasers in Engineering, 2014, 57: 82-92.
- 16 Grossberg M D, Nayar S K. A general imaging model and a method for finding its parameters[C]. ICCV, 2001, 2: 108-115.
- 17 Ramalingam S, Sturm P, Lodha S K. Towards complete generic camera calibration[C]. CVPR, 2005, 1: 1093-1098.
- 18 Ramalingam S, Sturm P, Lodha S K. Theory and experiments towards complete generic calibration[J]. INRIA, 2005.
- 19 Sturm P, Ramalingam S. A generic calibration concept: Theory and algorithms[J]. INRIA, 2003.
- 20 Yin Y, Wang M, Li A, *et al.* Ray-based calibration for the micro optical metrology system[C]. SPIE, 2014, 9132: 91320K.
- 21 Yin Y, Wang M, Gao B Z, *et al.* Fringe projection 3D microscopy with the general imaging model[J]. Optics Express, 2015, 23(5): 6846-6857.
- 22 Zhang S, Huang P S. Novel method for structured light system calibration[J]. Optical Engineering, 2006, 45(8): 083601.
- 23 Yu Xiaoyang, Wu Haibin, Yin Liping, *et al.* 3D measurement technology based on structured light by combining gray code with phase-shift[J]. Journal of Harbin University of Science and Technology, 2007, 12(5): 5-7.
于晓洋, 吴海滨, 尹丽萍, 等. 格雷码与相移结合的结构光三维测量技术[J]. 哈尔滨理工大学学报, 2007, 12(5): 5-7.
- 24 Krishnan D, Tay T, Fergus R. Blind deconvolution using a normalized sparsity measure[C]. CVPR, 2011: 233-240.