

面阵相机内外参数标定方法及进展

石岩青, 常彩霞, 刘小红, 李梓瑜, 张宗华*, 高楠, 孟召宗

河北工业大学机械工程学院, 天津 300130

摘要 相机标定是成像和计算机视觉的基础,也是传感和视觉检测的前提。相机将空间物体的三维特征点以二维形式呈现在成像平面,相机标定通过空间三维特征点与对应二维图像点确定相机的各个参数,包括内部光学特性参数的标定和相机在三维空间坐标系中位姿的标定。在简述面阵相机工作原理的基础上,对面阵相机标定模型、标定方法以及大视场相机快速标定方法进行了综述,然后讨论了相机应用领域以及标定技术的最新进展,最后展望了相机标定未来的研究方向。

关键词 探测器; 相机标定; 成像模型; 传统标定方法; 自标定方法; 大视场标定

中图分类号 0436

文献标志码 A

doi: 10.3788/LOP202158.2400001

Calibration Methods and Progress for Internal and External Parameters of Area-Array Camera

Shi Yanqing, Chang Caixia, Liu Xiaohong, Li Ziyu, Zhang Zonghua*, Gao Nan, Meng Zhaozong

School of Mechanical Engineering, Hebei University of Technology, Tianjin 300130, China

Abstract Camera calibration is the basis for imaging and computer vision as well as the premise for sensing and vision detection. The camera presents the three-dimensional feature points of space objects in a two-dimensional form on the imaging plane. Each parameter of the camera is determined by the three-dimensional feature points in space and the corresponding two-dimensional image points. This process is called camera calibration, including the calibrations of the internal parameters and the position and pose of the camera in the three-dimensional spatial coordinate system. Based on a brief introduction of the working principle of the area-array camera, this paper summarizes the area-array camera calibration model, calibration methods, rapid calibration methods for large field-of-view cameras, and discusses the latest camera application fields and calibration technologies. Finally, the future research direction of camera calibration is prospected.

Key words detectors; camera calibration; imaging model; traditional calibration method; self-calibration method; large field-of-view calibration

OCIS codes 040.1490; 150.1488

1 引言

从探月工程“嫦娥一号”卫星探测器的 CCD (Charge Couple Device) 立体相机,到“嫦娥三号”卫星探测器的降落相机以及“玉兔号”月球车的全景相

机,从“天和”核心舱发射过程中的火箭观测相机,到“祝融号”火星车的导航相机等,具有不同作用的相机承担了观察与测量的重要任务,为空天环境下各项科学研究提供了重要保证。其实,除了在航空航天领域,相机在机器视觉、虚拟现实、文物保护、工业

收稿日期: 2021-07-01; 修回日期: 2021-08-05; 录用日期: 2021-08-26

基金项目: 重大科学仪器设备开发重点专项(2017YFF0106404)、国家自然科学基金(52075147)

通信作者: *zhzhang@hebut.edu.cn

检查、逆向工程等领域^[1-8]也有广泛的应用。

从摄影测量学领域开始,许多研究者对相机进行了大量的研究工作^[9-13],特别是在计算机视觉领域。三维测量技术是利用相机采集的二维图像信息,通过分析处理和公式计算等,恢复出空间物体的三维形貌信息。由于具有高速、非接触测量、高分辨率、不损坏被测物体表面等优点,三维测量技术得到了广泛研究,并被应用于航空航天、智能制造、智慧城市等领域。此技术的关键是建立三维空间点和二维图像点之间的一一对应关系,而这种对应关系是由相机所在位置和姿态及相机成像的几何模型所决定的。相机内部参数和外部参数的标定是三维测量技术的基础,其标定的精度决定了三维测量数据的精度。因此,相机标定是机器视觉和三维测量技术中最重要和最基本的一步^[14-16]。

为促进视觉测量相关技术的发展,使研究者对面阵相机标定有更深入的理解,本文综述了面阵相机标定方法及最新进展。首先简单介绍了典型的相机模型,包括线性模型和非线性模型。然后总结了相机标定方法的分类,并且对比分析了各种方法的优缺点,指出了影响典型面阵相机标定方法误差的主要因素。同时简述了大视场相机的快速标定。接着讨论了一些新的特殊领域相机的应用及其标定技术。最后进行总结,并指出相机标定未来的研究方向。

2 相机模型

面阵相机模型描述的是相机将真实三维世界的坐标点映射到二维图像平面的过程。相机不同的工作原理,对应的相机模型有很多种,主要有透视投影模型、立体图投影模型以及双目相机模型等,不同的相机模型所要求解的参数矩阵也不同。广泛用于视觉测量的单目相机模型一般都是基于透视模型,主要分为针孔模型(线性模型)和镜头畸变模型(非线性模型)两种。

针孔相机模型视镜头为理想化的小孔成像,而实际相机镜头使得光线在投影到成像平面的过程中产生畸变。非线性相机模型考虑到镜头畸变,在参数计算过程中加入物点在相机靶面上实际所成像与理想成像之间的非线性约束关系。因此,在不考虑相机镜头畸变的情况下,相机的内部参数主要包括主点坐标 (u_0, v_0) 和 x, y 方向上的等效焦距 f_x, f_y 。在考虑镜头畸变的情况下,它还包括径向畸变系数 K_1, K_2 和切向畸变系数 P_1, P_2 。影响测量精

度的内在主要因素之一是相机畸变^[17]。利用畸变模型对相机畸变进行修正后,精度会随着时空的变化而变化,主要原因是测量误差中还包含与数字图像测量精度有关的数据噪声。在提取和计算畸变系数的过程中,如果数据噪声小,畸变较大,那么畸变校正结果就较理想。因此,数据噪声是影响相机标定精度的外在因素^[18-20]。由于相机模型和方法比较多,本文主要对使用最广泛的典型相机模型进行分析。

2.1 线性模型

面阵相机成像几何模型的复杂程度决定了相机标定的复杂度^[21]。基于小孔成像原理的针孔成像模型是最简单的相机模型,被广泛应用于相机标定过程中。相机的内参在出厂之后通常是固定的,而标定过程就是确定相机内参的过程。相机的外部参数是相机的位姿,主要包括从世界坐标系到相机坐标系的旋转和平移。与内参不同,外参会随着相机的使用或者运动发生改变。因此,通过估计与分析外参,可以获得运动相机的轨迹及空间姿态等信息^[22]。

针孔相机成像模型如图1所示,其定义了四个坐标系^[23]:像素坐标系 O_p-uv 、图像坐标系 $O-XY$ 、相机坐标系 $O_c-X_cY_cZ_c$ 和世界坐标系 $O_w-X_wY_wZ_w$,具体如下。

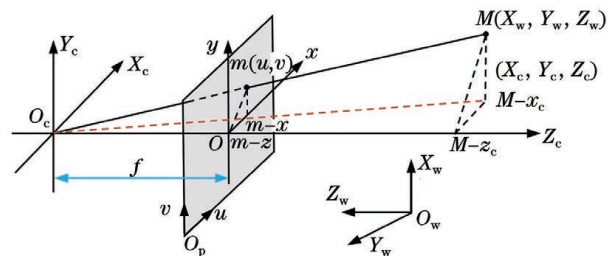


图1 针孔相机成像模型^[23]

Fig. 1 Imaging model of pinhole camera^[23]

1) 像素坐标系 O_p-uv :二维坐标系,描述相机芯片中的像素排列,表征图像物理坐标系的离散化。原点 O_p 通常定义在图像矩阵的左上角, u, v 轴分别平行于成像靶面两边,坐标单位是像素(pixel)。

2) 图像物理坐标系 $O-XY$:二维坐标系,描述空间物点投影在成像靶面上的实际物理位置。坐标原点 O 定义为相机光轴延长线与成像靶面的交点, x, y 轴分别与像素坐标系的 u, v 轴平行,坐标单位是毫米(mm)。

3) 相机坐标系 $O_c-X_cY_cZ_c$:三维坐标系,联系

世界坐标系与图像坐标系的桥梁。将相机镜头的光心设定为坐标原点,记作 O_c 。 X_c 、 Y_c 轴分别与图像坐标系的 x 、 y 轴平行, Z_c 轴与相机光轴重合,坐标单位是毫米(mm)。

4) 世界坐标系 O_w - X_w Y_w Z_w :三维坐标系,以其为基准可以描述相机和待测物体的空间位置。一般根据实际情况自由设定,坐标单位是毫米(mm)。

$$Z_c \begin{bmatrix} u \\ v \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1/d_x & \gamma & u_0 \\ 0 & 1/d_y & v_0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} f & 0 & 0 & 0 \\ 0 & f & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{R} & \mathbf{T} \\ \mathbf{0} & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_w \\ Y_w \\ Z_w \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f_x & \gamma & u_0 & 0 \\ 0 & f_y & v_0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{R} & \mathbf{T} \\ \mathbf{0} & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_w \\ Y_w \\ Z_w \\ 1 \end{bmatrix} = \mathbf{A} \begin{bmatrix} \mathbf{R} & \mathbf{T} \\ \mathbf{0} & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_w \\ Y_w \\ Z_w \\ 1 \end{bmatrix}, \quad (1)$$

式中: f 为相机光心到像平面的距离,即相机焦距; γ 为倾斜系数,表示 u 轴和 v 轴的不垂直因子,标准相机的 γ 通常为0; d_x 、 d_y 分别为单位像素在水平和垂直方向上的物理尺寸; $\mathbf{A} = \begin{bmatrix} f_x & \gamma & u_0 & 0 \\ 0 & f_y & v_0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}$ 为相机内参矩阵, $f_x = f/d_x$, $f_y = f/d_y$, u_0 和 v_0 为一般相机的内参; \mathbf{R} 为旋转矩阵,是 3×3 的单位正交矩阵; \mathbf{T} 为平移向量。

2.2 非线性模型

理想的针孔模型是真实相机模型的一种近似。在实际生产过程中,由于面阵相机各个部件的加工误差和装配误差的影响,相机光学模型和理想模型存在一定的差别,如相机在加工中存在镜头畸变的误差以及相机成像模型中存在畸变等,这些畸变是非线性的光学畸变。非线性相机模型即考虑到镜头畸变,将物点在相机靶面上实际所成的像与理想成像之间的非线性约束关系加入到了参数计算过程中。

图2为镜头畸变像点和理想位置的示意图。镜头的畸变是指像点偏离理想位置,使得成像系统不再严格符合理想相机模型。镜头畸变主要包含径向畸变和切向畸变,如图2所示,分别是成像系统在径向以及切向上出现的误差。引起镜头畸变的误差源主要包括径向畸变、偏心畸变和薄棱镜畸变^[25]。径向畸变主要由镜头径向曲率变化引入,其使得图像

在针孔相机模型下,为了建立空间物点 M 的世界坐标(X_w, Y_w, Z_w)与其在成像靶面上成像位置 $m(u, v)$ 之间的相互关系,需要经过三次转换:世界坐标系到相机坐标系的刚体转换、相机坐标系到图像物理坐标系的透视投影变换及图像物理坐标系与像素坐标系之间的坐标转换^[24]。

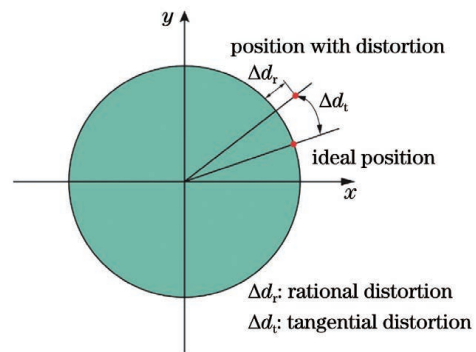


图2 镜头畸变

Fig. 2 Lens distortion

点沿镜头半径方向移动。使像点沿远离图像的方向移动的径向畸变称为枕形畸变,使像点向靠近图像中心位置方向移动的径向畸变称为桶形畸变。光学镜头制造误差可导致镜头成像出现偏心畸变和薄棱镜畸变。偏心畸变是指各透镜的光轴中心没有严格共线引起的畸变。薄棱镜畸变是镜头设计缺陷以及加工安装误差所造成的畸变。偏心畸变和薄棱镜畸变既引入径向畸变也引入切向畸变,一般薄棱镜畸变引入的图像失真较小,可以忽略。

在镜头畸变模型中,物点 M 的理想成像位置坐标为 (x, y) ,径向畸变和切向畸变导致的位移偏差为 $(\Delta x, \Delta y)$,则实际像点坐标可表示为

$$\begin{cases} x_d = x + \Delta x \\ y_d = y + \Delta y \end{cases}. \quad (2)$$

基于Brown失真模型, Δx 、 Δy 表示为

$$\begin{cases} \Delta x = x(K_1 r^2 + K_2 r^4) + [2P_2 xy + P_1(r^2 + 2x^2)] \\ \Delta y = y(K_1 r^2 + K_2 r^4) + [2P_1 xy + P_2(r^2 + 2y^2)] \end{cases}, \quad (3)$$

式中： $r^2 = x^2 + y^2$ ； K_1 、 K_2 是径向畸变系数； P_1 、 P_2 为切向畸变系数。

3 相机标定方法

相机的标定是从拍摄的二维图像的特征点和特征线来获取空间物体三维信息的基本步骤。空间物体三维形貌的恢复与重建以及三维大场景扫描测量^[26]等技术就是以相机模型为基础来建立各个坐标系的对应关系。通常面阵相机标定方法分为三种不同类型：传统标定方法、自标定方法和基于主动视觉的标定方法。

3.1 传统标定方法

传统标定方法是将一个结构参数确定、加工精度相对较高的物体作为标定过程中的参照物。该方法先将二维图像点与空间三维信息建立起一

一对应的关系，然后通过优化算法来计算相机的内部参数和外部参数，所选取的标定参照物可以是二维，也可以是三维^[27]。传统标定方法具有标定精度高、标定简单、标定速度快等优点，可以应用于任意的相机模型，因此目前仍是使用较为广泛的相机标定方法。三维标定板只需一幅图像即可实现相机标定，标定速度快且可得到很高的标定精度，但高精密三维标定板的加工和维护比较困难。平面标定板标定时需采集两幅或两幅以上的图像，但制作简单，精度易保证。常用的平面标定板有棋盘格标定板^[28-29]、实心圆标定板^[30-31]、圆环标定板^[32-33]和相位标定板^[34]，如图3所示。典型的传统标定方法主要有直接线性变换法、两步法、双平面方法、圆环标识法以及相位标靶标定法等。

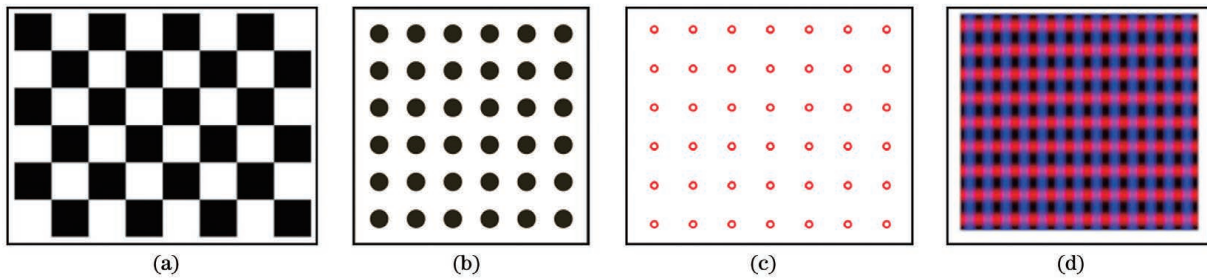


图3 平面标定板。(a)棋盘格；(b)实心圆；(c)同心圆环；(d)相位标靶

Fig. 3 Plane calibration boards. (a) Checkerboard; (b) solid circle; (c) concentric ring; (d) phase target

3.1.1 直接线性变换法

Abdel-Aziz 等^[35]提出了直接线性变换法(Direct Linear Transform, DLT)。该方法通过对相机的参数矩阵进行分解，利用直接线性方法求解相机内部参数和外部参数。DLT 需要利用至少6个控制点来计算投影矩阵，如果有6个以上的点，DLT 先将重投影的平方误差最小化，然后利用投影矩阵进行计算。但此方法的异常值处理过程的鲁棒性不强。基于DLT的标定过程简单、标定速度快，但是由于没有考虑相机本身畸变因素的影响，标定的精度一般不高。

$$s \begin{bmatrix} u \\ v \\ 1 \end{bmatrix} = \mathbf{K}(\mathbf{R}\mathbf{t}) \begin{bmatrix} X_w \\ Y_w \\ Z_w \\ 1 \end{bmatrix} = \mathbf{P}_{3 \times 4} \begin{bmatrix} X_w \\ Y_w \\ Z_w \\ 1 \end{bmatrix}, \quad (4)$$

式中： $(u, v, 1)$ 为像素坐标系下点的齐次坐标；

(X_w, Y_w, Z_w) 为世界坐标系下空间点的欧氏坐标； \mathbf{K} 为内参矩阵； \mathbf{t} 为平移向量； $\mathbf{P}_{3 \times 4}$ 为 3×4 的透视投影矩阵； s 为未知尺度因子。

Yakimovsky 等^[36]提出一种利用变换矩阵和最优化的标定方法来标定相机参数。该方法与直接线性变换法的区别只是一个比例因子，因此本质上是相同的^[37]。

3.1.2 两步法

两步法(Two-stage Technology)^[38]是在直接线性变换法的基础上进行改进的相机标定方法。此方法首先利用直接线性变换方法或透视变换方法求解相机的一部分参数，再把求得的参数作为初始值，将相机本身的畸变因素考虑进去，利用优化算法提高相机标定的精度。两步法将线性和非线性优化法结合在一起，避免了这两种方法的不足之处。两步法分类有很多，其中 Tsai^[39]提出的方法得到了最为

广泛的应用。

Tsai^[39]提出的基于径向约束的两步法标定相机方法,是一种介于线性标定和非线性标定方之间的灵活的相机标定方法。其主要的标定原理是:首先根据一阶径向一致约束(Radial Alignment Constraint, RAC)求解相机的外参,然后通过优化算法标定相机系统的其他参数。

相机畸变如图4所示,只考虑径向偏差,理想图像坐标到数字图像坐标的变换为

$$\begin{cases} (x - u_c)[1 + k_1(u^2 + v^2)] = u - u_c \\ (y - v_c)[1 + k_1(u^2 + v^2)] = v - v_c \end{cases}, \quad (5)$$

式中: (u, v) 为一个点的数字化坐标; (x, y) 为理想的数字化坐标; (u_c, v_c) 为畸变中心。

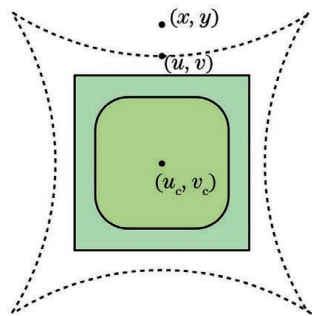


图4 镜头的径向畸变

Fig. 4 Radial distortion of lens

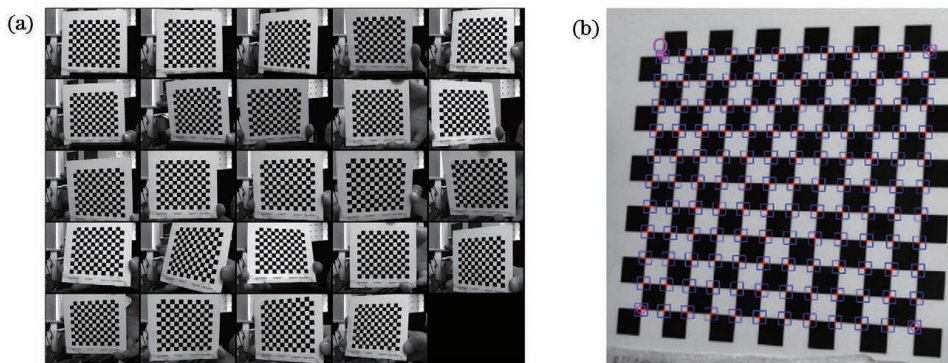


图5 棋盘格标定法的部分过程。(a)相机采集的不同姿态下的棋盘格图像;(b)标定图像的角点

Fig. 5 Partial processes of chessboard calibration method. (a) Checkerboard patterns captured by camera under different poses; (b) corners of calibration image

除了上面提及的基于两步法的相机标定法之外,Sid-Ahmed等^[41]提出将相机的径向畸变和切向畸变共同考虑在内的相机标定方法,提高了相机的标定精度。Weng等^[42]提出了一种基于立体视觉的非线性相机畸变模型。该方法首先使用无失真相机模型的封闭形式的解估计校准参数。然后考虑相机畸变,通过非线性优化迭代算法改进估计的参数。根据最小方差估计法,用估计的校准参数进行计算,

在径向一致约束中,图像平面上的点 (u_c, v_c) , (x, y) , (u, v) 共线,则有

$$\frac{x - u_c}{y - v_c} = \frac{u - u_c}{v - v_c}. \quad (6)$$

将图像中心取作畸变中心的坐标,则

$$\frac{x - u_o}{y - v_o} = \frac{u - u_o}{v - v_o}. \quad (7)$$

此方法采用RAC方法得到初始值,减少了算法的优化次数,提高了运算速度。这种方法将相机的径向畸变考虑在内,一般只考虑径向畸变就可以得到很高的标定精度。但对于切向畸变较大的相机模型,这种方法不适用。

Zhang^[28,40]提出了一种可以灵活利用平面标定板来标定相机所有内部参数和外部参数的方法。这种方法考虑了相机的径向畸变,从不同角度多方位拍摄平面标定板图像。如图5所示,在标定过程中,平面标定板可以自由摆放、移动到不同位置或旋转不同角度。提取特征角点坐标,通过单应矩阵计算出相机的内外参数的初始值,利用非线性最小二乘法估计畸变系数,将相机的径向畸变考虑在内,最后使用极大似然估计法对标定的线性结果进行非线性优化。此方法中标定板的制作相对简单,标定精度高,具有较好的鲁棒性,目前在工业生产和制造等领域中的应用比较广泛。

其中最小化的目标函数是观测图像点与其推断图像投影之间的均方差。

上述方法都是基于两步法的思想,首先通过线性方法求解相机的一部分参数,然后将相机畸变引入到模型中,利用非线性方法进行优化。这些方法不仅提高了相机的标定精度,还避免了完全非线性的不稳定性,所需的实验条件简单。但由于需要进行非线性优化,即需要通过迭代方法来求得相机其

他参数,因此存在计算速度慢、计算过程复杂和稳定性较差的缺点。

3.1.3 双平面方法

Martins 等^[43]提出了一种双平面模型,如图 6 所示。该方法利用相机在世界坐标系中的视线,通过两个平面与二维图像面上某点的连线,建立三维空间坐标到二维图像坐标的对应关系。再利用局部插值的方法,即通过图像上的点和前后两个平面对应点的连线,建立双平面线性样条模型,然后计算视线光线所需要的模型参数值。这种方法可以直接利用线性法求解相关参数,而且利用两个平面建立的二次模型的精度相对较高。但是与针孔相机标定模型相比,这种双平面标定方法的稳定性与可靠性较弱,要求解大量的未知参数,存在过分参数化的倾向。

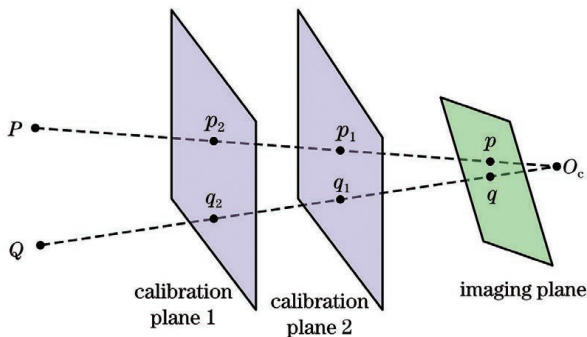


图 6 双平行平面模型

Fig. 6 Double parallel plane model

3.1.4 圆环标识法

圆环标识法目前被广泛应用于相机标定中。此方法的有效性主要依赖于圆心特征点的提取精度。Heikkila 等^[30]提出了简化的圆形目标偏心误差数学模型,如图 7 所示。此模型与成像系统及圆半径

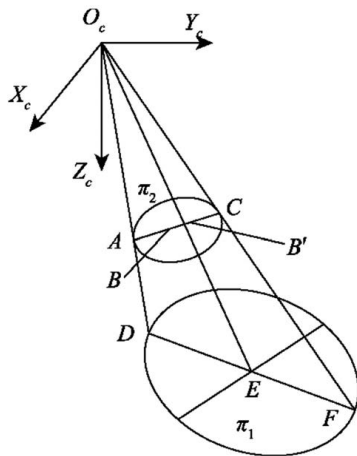


图 7 空间圆的透视投影示意图^[31]

Fig. 7 Schematic of perspective protection of spatial circle^[31]

有关,同时提出了基于同心圆环模型的补偿方法,利用同心圆环的内外半径及投影后的椭圆中心得到校正后的真实圆心。Jiang 等^[44]针对同心圆提出了一种从圆内任意初始点开始迭代并收敛于圆心真实投影点的几何方法,并利用同源性约束进行了非线性优化。但由于需要精确提取出椭圆边缘并且使用迭代方法,该方法的计算效率和稳定性还有待验证。

Kim 等^[31]提出一种基于射影变换的圆阵标靶中心像点的计算方法。该方法在完成退化椭圆边缘的亚像素坐标提取之后,通过迭代计算射影变换关系,将退化椭圆边缘映射成较规则的圆,剔除异常点并计算圆心坐标,然后通过迭代计算进行射影逆变换。此时,收敛的圆心坐标点即为圆心像点。

安晶晶等^[33]基于同心圆环模型,利用边缘检测、椭圆拟合等原理及偏心误差校正公式实现了圆心投影点的精确定位。从圆环半径比、旋转角度方面校正圆心偏差。如图 8 所示,该方法采用显示器为物平面对圆环中心进行校正,省去了标定板的制作过程,只需知道内外圆半径的值即可对圆心投影点进行精确定位,具有较强的通用性和一定的工程实际应用价值。但此方法仍然是在求取图像椭圆方程的基础上实现的,因此对图像的提取精度有一定的依赖。

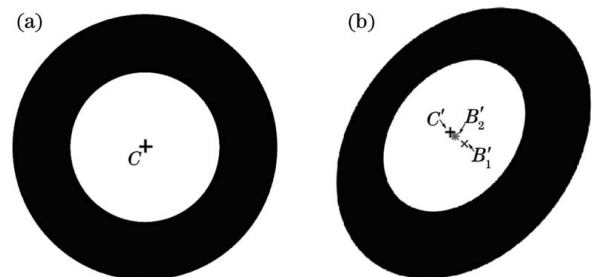


图 8 空间同心圆环的透视投影变换^[33]。(a)物平面的同心圆环;(b)成像平面的同心圆环

Fig. 8 Perspective projection transformation of spatial concentric circle^[33]. (a) Concentric circle in object plane; (b) concentric circle in imaging plane

张宗华等^[45]针对圆环编码标志点中心提取方法易受拍摄角度影响的问题,提出了一种基于编码环带径向直线拟合提取标志点中心的方法。该方法首先提取编码标志点的边缘,并且分割出其环带中的径向直线,如图 9 所示。然后利用高斯拟合法对边缘点进行亚像素定位,将提取出的亚像素边缘集映射到参数空间变成曲线,求出所有曲线的交点。

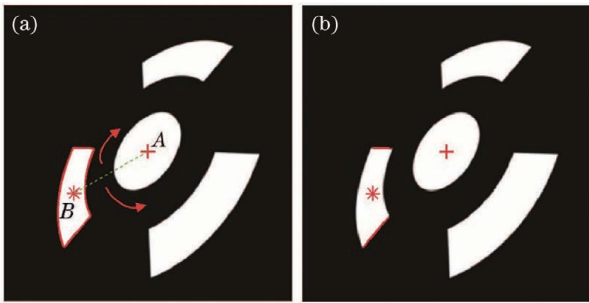


图9 分割直线边缘原理图^[40]。(a)分割原理;(b)分割结果
Fig. 9 Principle diagram of line-edge segmentation^[40].
(a) Principle of segmentation; (b) result of segmentation

最后利用随机采样一致性算法进行拟合,并将结果映射到原始坐标空间得到中心坐标。

卢晓东等^[46]针对标靶图像中椭圆中心投影偏差影响相机标定精度的问题,提出了一种将标靶图像逆向投影并进行迭代标定的算法。如图10所示,该方法首先使用椭圆中心提取方法获得圆心坐标,然后将获得的参数和图像进行逆向投影,从而获得虚拟的标靶图像。基于虚拟图像再进行圆心坐标的提取,将圆心的物理坐标投影到图像上,并将其作为圆心的真实像点坐标进行标定。最后,经过多次迭代投影和标定过程,可以获得高精度的参数。

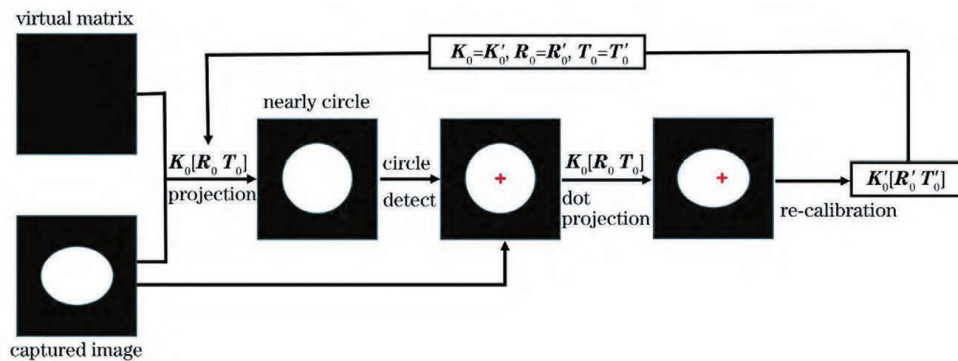


图10 标靶圆特征点的迭代标定过程^[46]

Fig. 10 Iterative calibration process of circular feature points on target^[46]

3.1.5 相位标靶标定方法

近年来,利用相位标靶^[47-55]进行相机标定引起了国内外研究人员的关注。薛俊鹏等^[47]提出了一种基于同心圆光栅和楔形光栅的相机自标定方法。Huang等^[48]提出了一种主动相位标靶和平差约束的精确特征点检测方法。以上两种方法分别使用四步和八步相移来计算包裹相位。虽然标定精度较高,但需要采集多张条纹图,因此标定速度不高。

Ma等^[49]提出了将条纹图案组作为相位标靶的特征点提取方法。如图11所示,该方法采用三步相移算法计算水平和垂直方向的折叠相位,具有较高的标定准确性,但同样存在标定效率较低等问题。Sagawa等^[50]将相机标定与相位标靶、经典平面标靶进行比较,结果显示,相位标靶具有一定优势,即基于相位标靶提取特征点时,图像边缘的离焦对提取效果的影响较小^[56-57]。

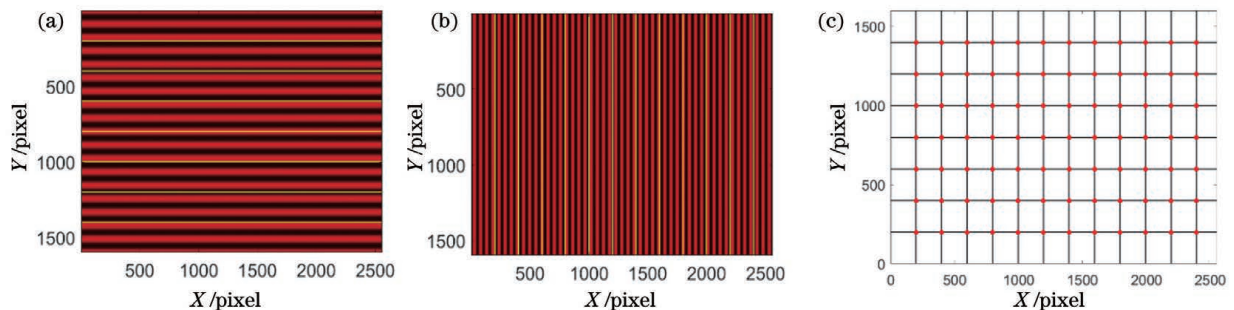


图11 相位标靶图。(a)水平正弦条纹;(b)竖直正弦条纹;(c)由水平、竖直正弦条纹确定的相位标靶

Fig. 11 Phase target patterns. (a) Horizontal sinusoidal fringe; (b) vertical sinusoidal fringe; (c) phase target determined by horizontal and vertical sinusoidal fringes

于瑾等^[55]提出了一种新的基于相位标靶的相机标定方法,如图12所示。该方法仅需一幅红、蓝

正交条纹图即可通过傅里叶变换和空间相位展开完成相位计算,同时标定精度得到了较大提高。与单

一水平或垂直条纹图案相比,红、蓝正交条纹图在标定过程中需要采集的条纹图像数量减少一半。利用傅里叶变换法和空间相位展开法进行相位计算简化了标定步骤,只需在每个标靶位置上采集一幅条纹

图。此外,采用红、蓝正交的正弦条纹可以有效减小通道间串扰的影响,提高了相位标靶方法标定相机的速度和精度。

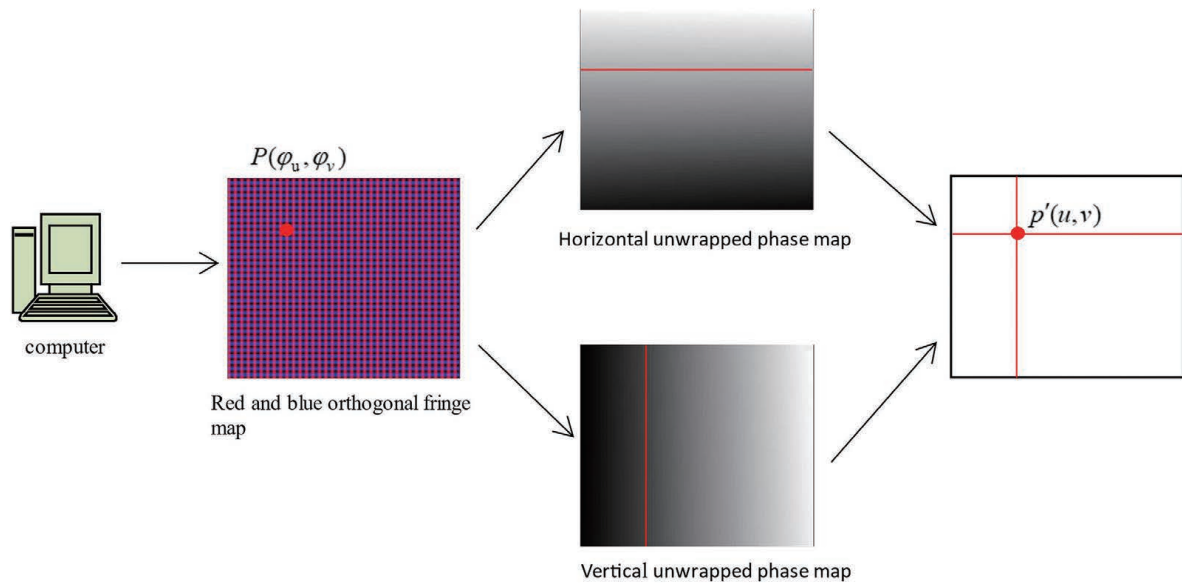


图12 相位点的世界坐标与相机像素坐标之间的映射关系^[55]

Fig. 12 Mapping relationship between world coordinates of phase points and camera pixel coordinates^[55]

3.2 自标定方法

随着计算机视觉领域的发展,传统的标定方法已经不能满足所有相机标定的需求。所以在传统标定方法的理论基础上,研究者进行了面阵相机标定方法的改进^[58-62]。Faugeras等^[63-65]首先提出了自标定的概念,随后大量研究者对自标定的方法进行了研究^[66-67]。此方法主要包括基于Kruppa方程的自标定方法、分层逐步标定法和基于二次曲面的自标定法。

3.2.1 基于Kruppa方程的自标定方法

Faugeras^[64]提出了基于Kruppa方程的自标定方法。该方法是相机从三维环境空间进行透视投影,考虑到射影空间的子集到二维视网膜空间被认为是射影平面的子集,两幅图像间存在着两个Kruppa方程的二次非线性约束。在代数几何概念的基础算法上,利用改进的优化法求解方程。利用Kruppa方程求得多幅图像上的所有像点到对应极线的距离之和,并对这个距离采用Levenberg-Marquardt算法求最小值,求出相应的相机内外参数。该方法直接在两两图像之间建立方程关系,避免对一系列图像进行射影重建,缩短了标定时间。但无法保证无穷远平面在所有图像对确定的射影空间里的一致性。当图像序列较长时,基于Kruppa

方程的自标定方法会不稳定^[68-69],而且直接求解Kruppa方程比较困难。

3.2.2 分层逐步标定法

Maybank等^[65]提出了将三维欧氏空间的重建分解成三步,即分层逐步标定的方法。首先根据图像对应点进行射影标定^[70],并计算出射影意义下的相机投影矩阵^[71],然后对图像序列进行仿射标定,即确定无穷远处平面的位置。在仿射标定的基础上,确定绝对二次曲线(面)像的方程并计算出内参数,从而恢复出欧氏结构。在实际应用中,分层逐步标定法逐渐取代了基于Kruppa方程的自标定方法。分层逐步标定法在射影标定的基础上,把某一幅图像作为基准,进行射影对齐,然后通过非线性方法进行优化,求解出未知数。相对上述基于Kruppa方程的自标定方法,这样求解的未知数数量较少。但该方法在进行射影标定时,将某一图像作为基准,所以选择的图像不同,标定的结果也会不同,测量结果不具稳定性。

3.2.3 基于二次曲面的自标定法

Triggs^[72]提出基于二次曲面的相机自标定方法,将二次曲面应用到相机自标定中。这种方法利用了绝对二次曲线在欧氏变换下的不变性。绝对二次曲面对应图像上的绝对二次曲线,在输入多幅图

像的情况下,能实现一致的射影重建。该方法区别于分层逐步标定法,二维曲线和无穷远平面的信息都包含在上述二维曲面内,这样在进行射影重建时,无穷远平面上的每个图像信息都具有有一致性,标定结果一致且稳定。

自标定方法中的相机在标定的过程中不需要标定参照物,而是通过相机采集多幅图像信息,得到相机的内部和外部参数。但在不依赖参照物的情况下直接对图像信息进行分析,过程复杂,在对实时性要求较高的场合,此种方法不适应,且鲁棒性不足^[66]。利用自标定方法标定相机是基于绝对二次曲线或者绝对二次曲面,需要直接或间接求解 Kruppa 方程^[67]。此标定方法的精度不高,速度慢,不适用于虚拟现实、零部件的加工测量等场合。

3.3 基于主动视觉的标定方法

如果已经提前知道相机或被测物体的某些运动信息,如相机或被测物体的纯平移^[73-74]、光心旋转^[75]等,利用这些信息标定相机称为基于主动视觉的标定方法。因此在实际相机标定过程中,相机或被测物体的运动信息直接影响了相机标定的精度。该方法的主要特点是线性求解相机的所有内参,典型的方法有基于相机纯旋转的标定^[76]、基于相机三正交平移运动的标定^[77-78]、基于平面正交运动的相机标定^[79]、基于无穷远平面单应矩阵的标定^[80-81]和基于射影重建的标定^[82]。

Hartley^[76]提出了一种通过控制相机绕光心作纯旋转运动来标定相机的方法。在相同点的不同方位至少拍摄三个图像,并且根据图像之间的点匹配进行校准。该方法不需要知道相机的方位,仅基于图像的对应关系。这种方法的图像取自空间中的同一点,没有线性结构,因此优点是从空间中的同一点拍摄图像,其点匹配比用移动相机拍摄的图像容易得多,而且也不会出现遮挡、方向或照明的改变等问题。该方法需要相机绕光心作纯旋转运动,但在实际的标定过程中,很难准确地知道相机光心的具体位置。这样相机绕“光心”并不是真正准确的光心,这会给标定结果带来误差。

Ma 等^[77,78]提出了基于相机三正交平移运动的标定方法。该方法通过控制相机平台作4次平移运动,保证其中的任意3次平移运动不在同一个平面上,这样就可以线性标定出相机的内部参数及相机坐标系和移动平台坐标系之间的旋转矩阵。此方法利用立体视觉以及极点,可以线性求解相机坐标系与平台坐标系之间的平移向量,且该方法具有较强

的鲁棒性。但相机是完全射影模型,即当有畸变因素存在时该方法不适用。

李华等^[79]提出了基于平面正交运动的相机标定方法。通过控制相机作5组平面正交运动,利用平面图像中的极点信息来线性标定相机的内参数。当相机有畸变因素存在时,该方法也可以标定出相机的5个内部参数。由于该方法对图像中极点信息的精度依赖性很强,研究者提出了计算基本矩阵的两点算法,提高了计算极点的准确性和鲁棒性,标定结果稳定性较高。但该方法在实际标定过程中对标定设备要求较高。

吴福朝等^[80-81]提出了基于无穷远平面单应性矩阵的相机自标定方法。该方法没有要求相机的运动方式必须为正交运动,而是通过一次平移运动和两次任意刚体运动,就可确定相机的内部参数。既不需要射影重构,也不需要知道有限远平面的信息,只需确定图像的极点,就可确定无穷远平面的单应性矩阵。所提方法简便、易操作,是一种常用的自标定方法。

之后,李华等^[82]提出了一种基于射影重建的线性相机自标定方法。只要相机进行至少一次纯平移和两次带旋转的任意运动,该方法就可以求出相机的内部参数。该方法是一种线性方法,不涉及非线性的优化问题^[83],且该方法是一种基于投影重建的相机自标定方法,所有的图像信息在射影重建中都会用到,鲁棒性明显较强,对硬件设备的要求不高,易于实现,因此被广泛应用在相机标定中。

朱嘉等^[73]提出了一种基于主动视觉的坐标测量机的相机标定方法。研究者先是使相机作一组二维平移运动,然后通过采集圆孔标靶图像来计算圆心的像点坐标。将相机移动距离作为标定的特征点数据,建立包含多参数的相机模型,实现高精度的自动标定。顾国华等^[84]提出了一种基于二维旋转平台的相机参数标定方法。此方法首先通过坐标系的变换与逆变换,将相机的旋转平移变换关系转换为二维旋转平台纯旋转关系。借助旋转平台读数以及相机到旋转平台的固定变换关系,可以实现相机内参的精确标定以及任意位置间相机外参的相互转换。最终,利用标定出的相机与旋转平台间的变换矩阵,实现了不同位置相机参数的转换。徐秋宇等^[85]则是利用二轴转台提供的角度基准,提出了一种基于精密二轴转台的多相机内外参标定方法。此方法可应用于视觉定位、大尺寸测量和三维重建等领域。

3.4 相机标定方法比较

为更好地对前述典型相机标定方法进行说明,

本文对不同标定方法的性能进行了比较,如表1所示。

表1 不同标定方法的性能比较

Table 1 Performance comparison among different calibration methods

Method	Ref.	Target	Complexity	Speed	Accuracy	Robustness
Traditional calibration method	[35]	Yes	Low	Medium	Low	Low
	[39]	Yes	High	Low	High	High
	[28]	Yes	Low	Medium	High	High
	[43]	Yes	High	Low	High	High
	[33]	Yes	Medium	Medium	High	High
	[55]	Yes	Low	High	High	High
Self-calibration method	[63]	No	High	High	Low	Low
	[65]	No	Medium	High	Low	Low
	[72]	No	Medium	High	Low	Medium
Active-vision-based calibration method	[76]	No	Low	High	Low	Medium
	[77]	Yes	Low	High	Medium	Medium
	[81]	No	Low	High	Medium	Medium
	[82]	No	Low	High	Medium	High

传统标定方法基本都需要一个标定物作为参照,标定的精度通常与靶标的精度以及相机的模型直接相关。三维靶标通常价格昂贵,制作困难,但使用这类标定物的方法一般精度比其他标定方法高。二维靶标其实是从不同角度拍摄一个二维平面来代替三维靶标,然后利用二维平面点与图像点建立约束方程并进行标定。与基于主动视觉的方法不同,使用二维标靶的方法不需要准确的二维平面的运动信息,较为简便易用^[37]。

从算法的复杂度来看,面阵相机的标定模型越复杂,相机的标定结果越优,但是标定速度会下降。在一般标定场景中,不考虑三阶以上的畸变,但在高精度标定过程中,需要考虑镜头畸变^[86]。自标定方法以及基于主动视觉的方法在一般相机模型以及算法方面进行了一定的简化,因此标定速度较快。实际标定过程应根据需求选择合适的标定方法。

影响面阵相机标定精度的因素很多,以黑白棋盘格为例,主要有世界坐标精确度(标定板的制作和特征提取精度)、特征点的数目、标定图片的数量、图片拍摄的角度、棋盘格尺寸、光照条件等。其中,标定模板图像特征点的提取精度是影响相机标定精度的重要因素。苏显渝课题组通过人为加入高斯随机移动误差,验证了特征点提取误差对相机内部参数标定精度的影响,实验结果表明,误差的分布直接影

响标定结果的稳定性,且标定误差随所加随机误差均方差的增大而线性增大^[87]。

4 大视场相机的快速标定

在大空间复杂工件的测量过程中,快速且精确的大视场相机标定显得尤为重要,具有重要的研究意义。

徐巧玉等^[88]提出一种利用光学参考棒的大视场相机标定方法。研究者将光学参考棒作为相机标定的校准靶标,将光学参考棒摆放在相机成像范围内的不同位置,并将参考棒上三个共线且距离已知的红外发光二极管(Light-emitting Diode, LED)作为特征点,利用相机采集这些不同位置处的光学参考棒的特征图像,实现两个相机之间的外部参数的灵活标定。

孙军华等^[89]提出一种基于基线尺的大视场双目视觉传感器标定方法。研究者将基线尺摆放在相机测量范围内任意不同位置上,并且使用两个相机拍摄基线尺在这些不同位置处的图像。在基线尺上找两个特征点,并对其与基本矩阵进行约束,然后将线性解和非线性优化结合起来同时估算相机的内部参数和双目视觉传感器的结构参数。这种方法从操作上进行了优化,在不要求解初始参数的情况下就可以求解出相关参数。通过使用小型的标靶来代

替大型标靶,并将小型标靶摆放在多个不同位置,完成大视场相机的标定。但该方法本身具有一定的局限性,易受现场环境因素以及实验装置的影响,标定结果的稳定性较差。

为了提高大视场测量系统的精度,研究者们提出构建虚拟立体靶标的方法^[90-92]。在三坐标测量机的测头处固定一个靶点,通过三坐标测量机进行高精度位移后,在三维空间里构建起一个虚拟的立体靶标。该方法在一定程度上解决了三维靶标加工困难的问题,但是三坐标测量机的测量空间相对较小,移动的靶点不能覆盖整个标定空间。

杨博文等^[93]提出了一种通过自由移动相机建立多个立体靶标的相机标定方法。该方法在构建一个相机靶标的基础上,将相机移动到多个方位,并且每个方位相机都要拍摄其上的立体靶标,即可以求解出多组相机的内部和外部参数。将得到的多个虚拟立体靶标分布于整个测量空间,标定出整个大视场测量系统的参数,通过非线性优化求解相机参数

的最优解。

5 其他相机标定方法

相机标定确定了相机的内外参数。随着相机制造技术的不断发展,不同的探索领域出现了不同应用的相机。结合具体的实际应用场景,需要研究每种相机标定方法的有效性。

图13所示为相机技术的新应用。在航天设备领域,闫阿奇等^[94]利用鱼眼相机设计了一种航天相机光学系统,为在轨复杂环境下获得超广角空域信息提供了保证;在镜面三维测量领域,Niu等^[95]利用双远心相机设计了一种镜面测量系统,减小了测量系统景深的限制;在水下作业领域,增加了防水装置的相机可以帮助水下自主机器人更好地获取成像信息^[96];在特殊成像范围研究领域^[98],也有特殊的相机。本文仅讨论部分近期成功应用的例子,以期研究者选取满足不同环境要求的相机标定技术提供参考。

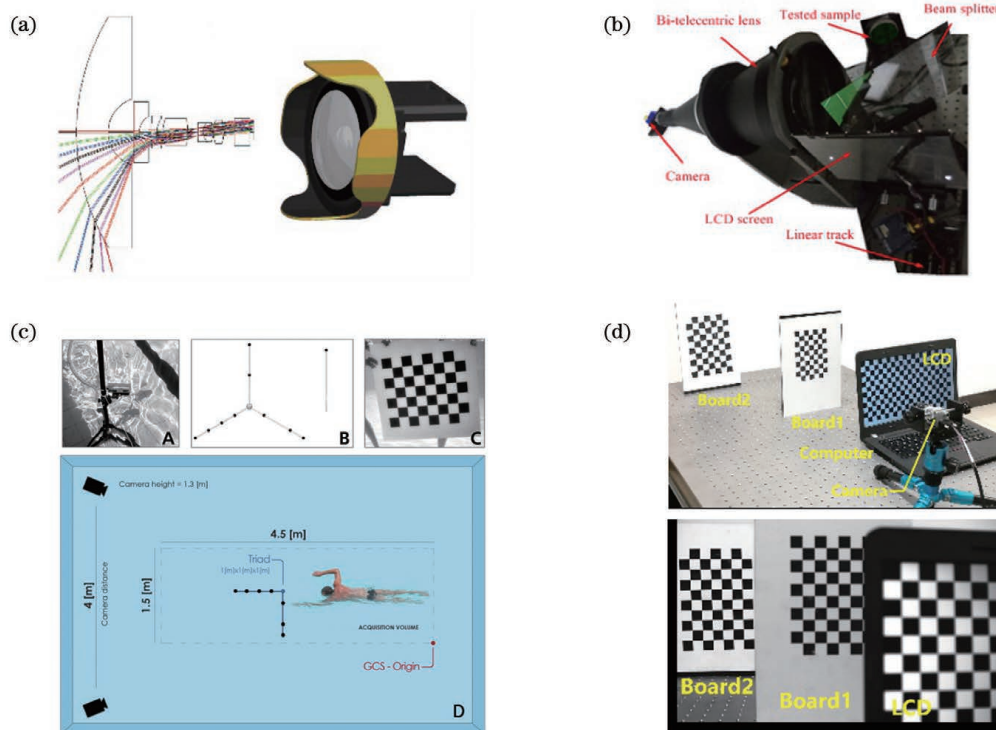


图13 相机技术的新应用。(a)航天鱼眼相机的光学系统和光机图^[94];(b)基于双远心相机的镜面物体测量系统^[95];
(c)水下相机的应用与标定^[96];(d)离焦相机的应用与标定^[97]

Fig. 13 New applications of camera technology. (a) Optical system and opto-mechanical image of spatial fisheye camera^[94]; (b) 3D shape measurement of specular objects based on bi-telecentric lens camera^[95]; (c) application and calibration of underwater camera^[96]; (d) application and calibration of defocus camera^[97]

5.1 广角相机的标定

广角镜头相机广泛用于机器视觉、大场景观测

以及医学内窥成像系统等领域^[99-102]。广角镜头具有镜头视角大、视野宽阔的特点,但焦距比较短。广

角镜头相机的成像存在较大畸变,如图14所示。畸变太大导致无法精确定义图像中物体的几何信息,

因此必须进行校正。

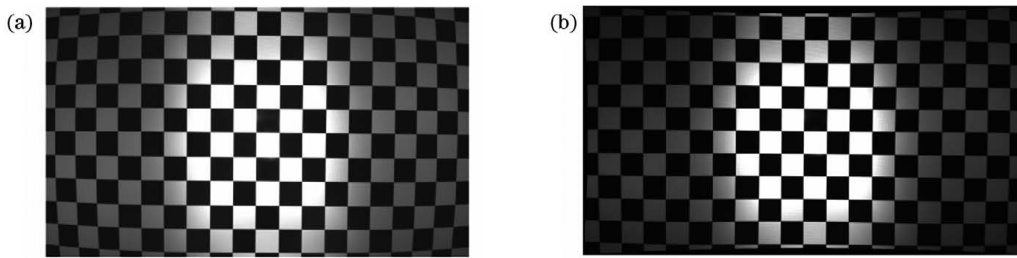


图14 校正前后的棋盘格图像^[103]。(a)畸变的;(b)校正后的

Fig. 14 Checkerboard images before and after calibration^[103]. (a) Distorted; (b) corrected

Kakani等^[104]提出了一种适用于多个大视场摄像机的自标定方法。此标定方法由三个模块组成:直线度约束损失的预处理和估计、使用直线度优化

和直线度约束损失最小化的参数估计、使用估计的失真参数的不失真模块。图15为其预处理的铅垂线校正模板。

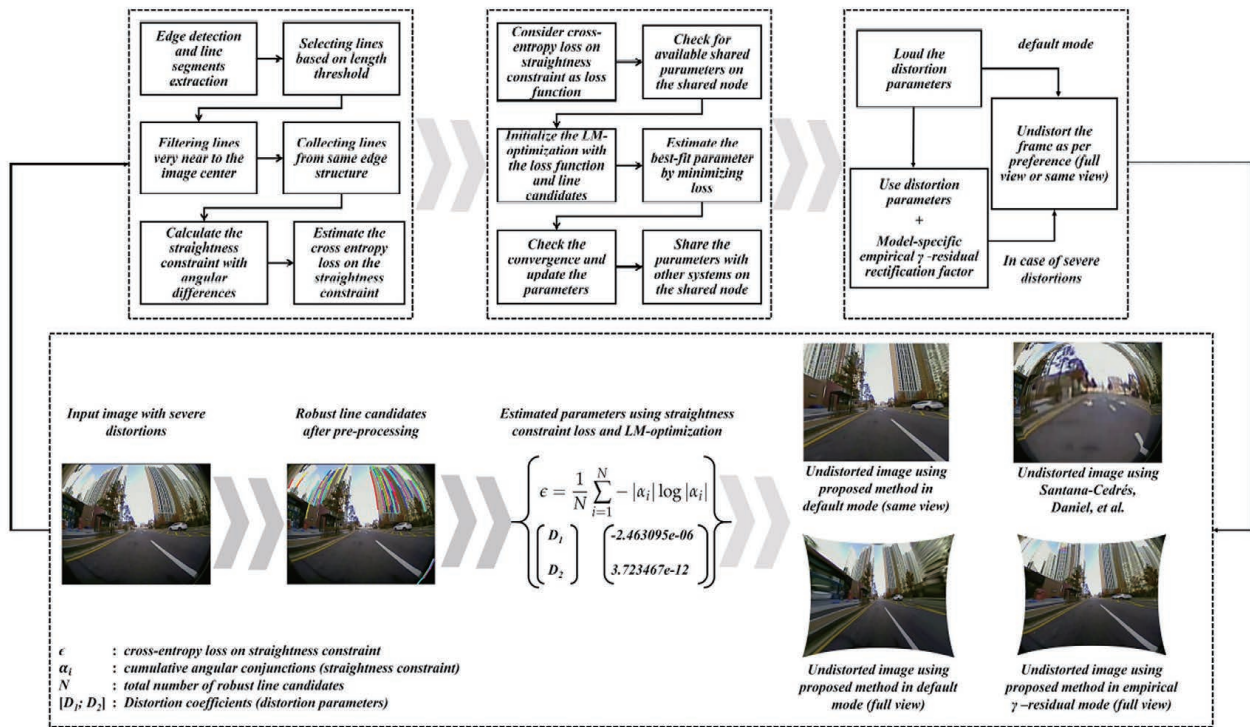


图15 文献^[104]中的自标定方法

Fig. 15 Self-calibration method in Ref. [104]

周维帅等^[103]提出了一种基于相移条纹图相位分析的广角镜头畸变校正方法,如图16所示。利用图像中心无畸变的相位值进行数值拟合,得到径向无畸变条纹图的相位分布,将其作为求解径向畸变相位的基准,将畸变相位转换成实际的畸变量。

5.2 双远心相机标定

双远心镜头相机具有场景点纯正交投影的特性,在特定的物距范围内可以保持恒定的放大率^[105-107]。图17是具有双远心镜头的相机模型。该模型由两个薄凸透镜组成,物与像的投影中心均

在无穷远处,两个透镜的焦点位置相同,因此也被称为无焦系统。在两个透镜焦点的交汇处有一个孔径光阑,因此只有平行于透镜光轴的光线才能通过光圈成像。将被测物体平行投影到相机成像靶面,因此图像的放大率与物距无关。在其工作范围内,双远心相机能够精确地获得物体的三维关系且不受镜头和相机成像单元间微小差异的影响。

Niu等^[95]根据双远心镜头工作原理,通过建立双远心相机的正交投影模型,针对双远心相机主要的畸变来源构建了畸变模型,并进行了双远心相机

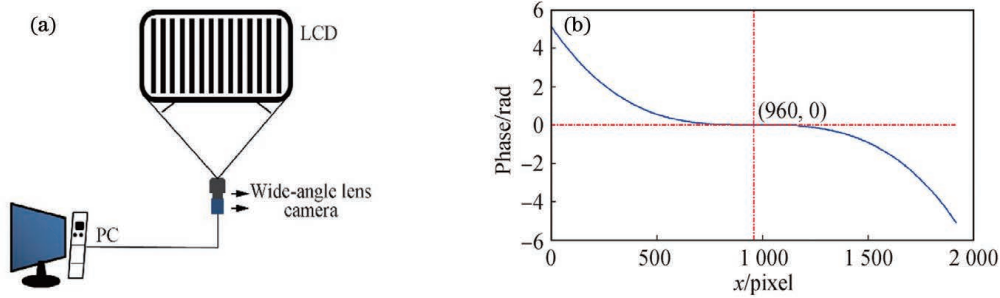


图 16 广角镜头畸变校正方法^[103]。(a)实验装置图;(b)径向畸变相位分布图

Fig. 16 Calibration of wide-angle lens distortion^[103]. (a) Diagram of experimental apparatus; (b) radial distorted phase distribution

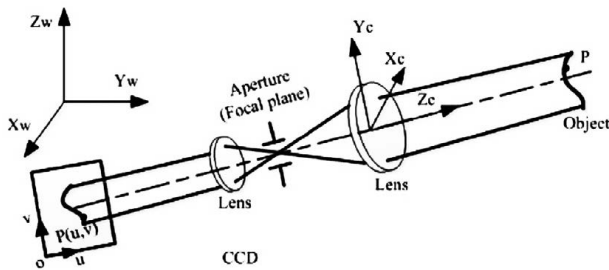


图 17 双远心镜头系统示意图^[106]

Fig. 17 Schematic of bi-telecentric camera system^[106]

标定。将改进的两步标定法用于双远心镜头的相机标定工作;首先基于无畸变相机模型,求解所有的相机外参和一个内参;然后利用非线性最小二乘法优化求解不同类型的畸变系数,并对第一步中求出的参数进行优化。

5.3 水下相机标定

相机作为机器的“眼睛”,随着人类探索领域的不断发展,需要应对越来越多的复杂情景,水下环境就是其中之一^[108-110]。水下环境对相机标定造成的影响主要体现在两个方面:首先是水对光的吸收和散射作用,使得图像存在对比度变低、亮度不均匀、模糊、颜色退变等问题^[111-112],图像质量严重下降;其次,折射的原因造成图像严重畸变,传统的成像模型在相机标定时不适用^[113]。因此,大多数水下相

机的研究都是为了解决这两个问题^[114]。

5.4 离焦相机标定

目前,大多数相机标定方法都需要获得标定物在相机成像中的精确像素坐标。对于某些特殊成像范围的相机,比如视场和景深比较小的微距相机^[115],在移动或者改变位姿过程中,标定物经常会出现相机的清晰范围之外^[116];在导航或者大视场测量的远程视觉系统中,若要保证标定精度,需要按比例制造一个与视觉系统大小相匹配的标定靶标,这增加了制造成本以及实现的困难程度^[117]。

Bell 等^[56]提出了一种允许使用较小标定物进行大范围视觉系统校准的方法。如图 18 所示,该方法使用数字显示器生成条纹图,将特征点编码到载波相位中。利用二进制条纹代替正弦条纹用于相位生成,在离焦时可以增强条纹的对比度,并消除数字显示屏非线性的影响。离焦相机校准的具体流程如下:首先,目标特征点由唯一定义的水平 and 垂直条纹图携带,液晶显示器显示条纹图;然后,使用离焦的相机采集条纹图,这些条纹图由于离焦而变得模糊;之后,利用这些采集的条纹图恢复水平和垂直相位图,从这些相位图中解码特征点;最后,使用恢复的特征点标定离焦相机。

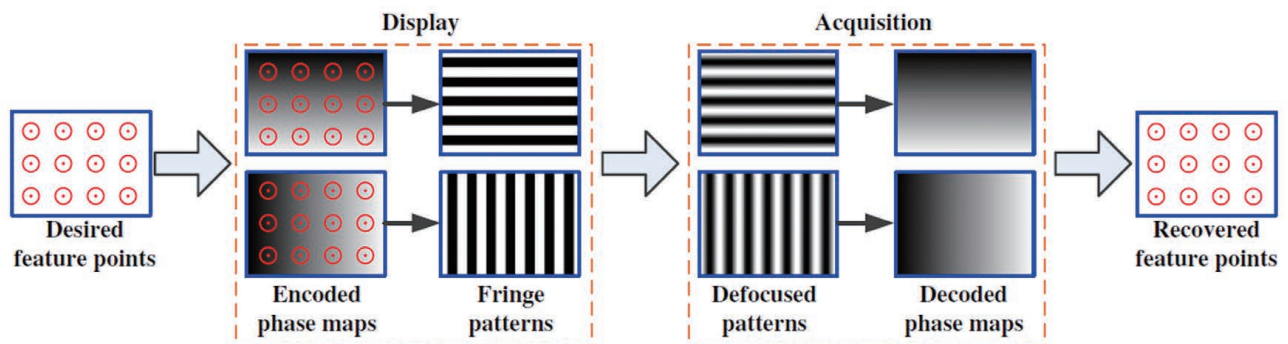


图 18 离焦相机的标定过程^[117]

Fig. 18 Calibration process of defocus camera^[117]

Liao 等^[98]提出了一种基于液晶显示器的稳健、准确的离焦相机标定方法。首先,利用时间编码的二进制相移条纹估计离焦图,如图 19 所示。然后,基于离焦图将 LCD 像素坐标编码为具有最佳频率

和阶跃特性的相移模式,并对捕获的条纹进行去模糊处理。最后,对模糊的条纹进行解码,生成密集的相位图,提取准确的特征点坐标。此相机标定方法对噪声、玻璃折射具有较强的鲁棒性。

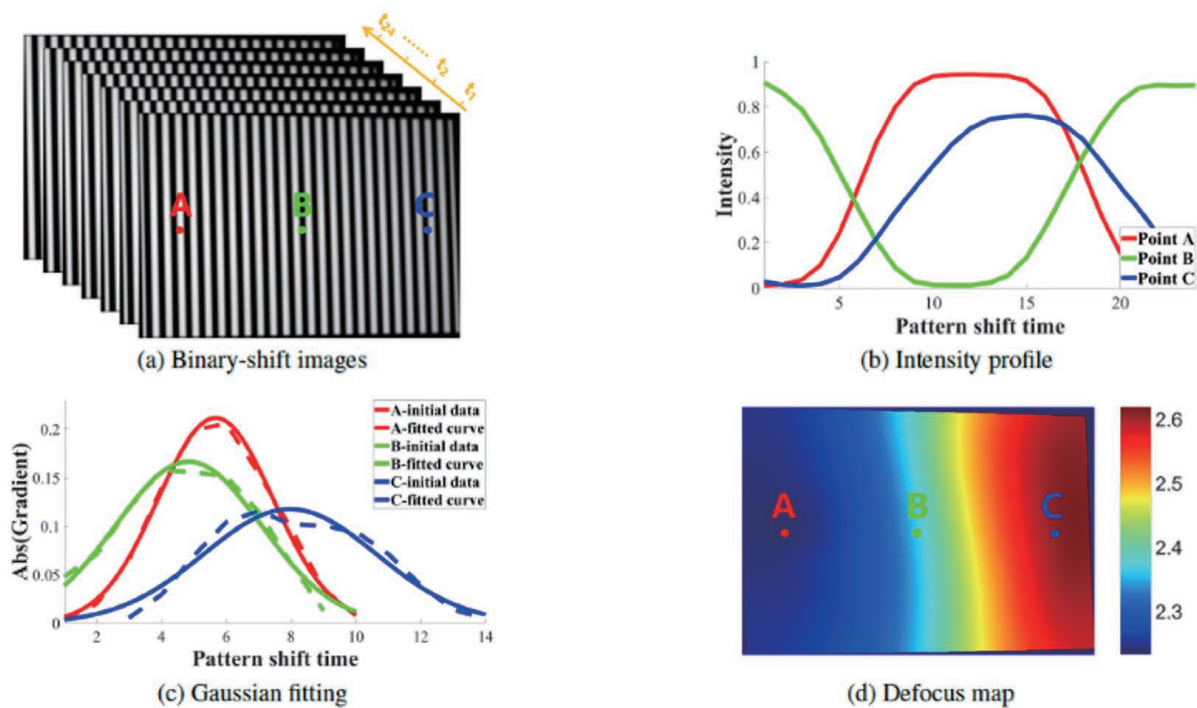


图 19 离焦图的估计过程^[97]

Fig. 19 Estimation procedures of defocus map^[97]

杨浩等^[116]提出了一种利用相移正弦结构光编码显示面板对离焦相机进行标定的方法,图 20 所示是其标定的主要流程。此方法使用 Floyd-Steinberg

Dithering 算法消除了显示面板 Gamma 变换带来的结构光相位计算误差,实现了相机在离焦状态下对标定物特征点的准确提取。

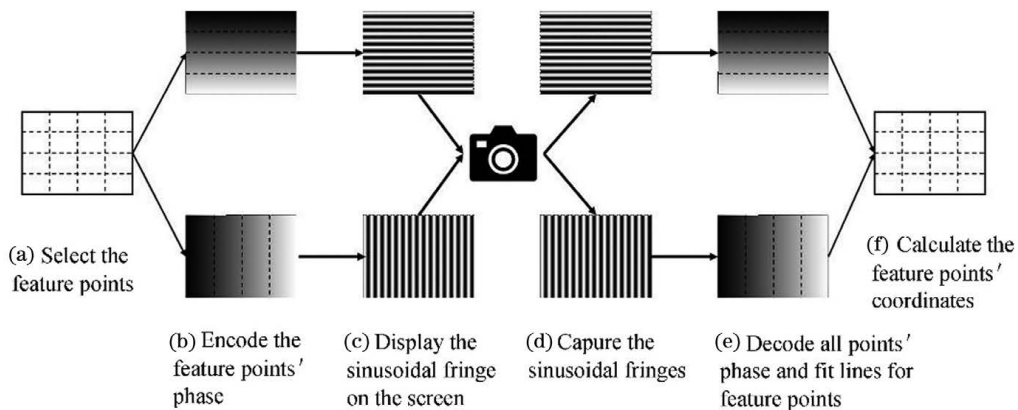


图 20 相机标定流程^[116]

Fig. 20 Calibration process of camera^[116]

6 总结与展望

概述了面阵相机标定的工作原理、标定模型、标定方法分类以及大视场相机的快速标定方法,介绍了面阵相机主要的特殊应用领域以及相应标定技术

的研究进展。尽管研究者们已经对相机标定技术进行了大量的研究,但随着探索领域的扩展和新需求的不断提出,目前的标定方法仍然存在诸多不足之处,需要改进以提高鲁棒性和灵活性。目前,基于深度学习的人脸检测^[118]、掌纹识别^[119-120]等技术,提

高了传统识别检测技术的精度。也有一些学者将深度学习应用于条纹分析^[121]、三维形貌恢复^[122-123]等领域,在一定程度上也提高了之前技术的应用范围和鲁棒性。这为相机标定技术的进一步发展提供了参考,将深度学习用于相机标定是一个值得探索的尝试。

现有标定方法的精度主要与相机模型、靶标的精度以及其他标定设备的性能有关。在已有方法的基础上,可融合各种相机模型的优点,结合不同靶标的特点,减少外在因素的影响,进一步研究如何有效、精确标定相机的内外参数。

随着相机成像技术的广泛应用与发展,相机标定技术越来越成熟。不仅需要高效优化的算法,而且应该考虑影响其标定精度的外在因素,以适应不同场景下的图像采集,尤其是在大场景测量中。而对于长焦距镜头,由于标定后的参数几乎没有受镜头畸变的影响,即使标定过程中考虑了相机镜头的畸变问题,也无法提高相机标定的精度。对于焦距较短的镜头,标定会产生明显的系统误差。所以在后续的研究和应用中,应找到合适的方法对标定误差进行补偿,并对标定结果进行优化。现有的标定方法各有优缺点,研究者都是在具体场合选择具体的标定方法。如何将不同方法的优点进行有效融合,并结合图像处理优势标定相机是后续研究的主要内容。

在优化相机模型提高标定精度的基础上,还需要兼顾标定速度。目前面阵相机标定速度主要与相机模型、算法的复杂性以及其他必要的标定流程所需要的时间等有关。提高各部分的执行效率,减少标定工作整体的时间,是提高标定速度的必要途径。

现有的各种标定方法存在过程比较繁琐、设备比较复杂等缺点,不便直接应用于各种现场环境中,因此便捷性是相机标定方法的一个重要发展趋势。将相机标定技术融入相机制造过程中以提高测量精度是一个很好的选择。

参 考 文 献

- [1] Marrugo A G, Gao F, Zhang S. State-of-the-art active optical techniques for three-dimensional surface metrology: a review[J]. *Journal of the Optical Society of America A*, 2020, 37(9): B60-B77.
- [2] Wang Z Z. Review of real-time three-dimensional shape measurement techniques[J]. *Measurement*, 2020, 156: 107624.
- [3] Ma Y Z, Tao L Y, Wang X H. Application of computer vision technology[J]. *Test Technology and Testing Machine*, 2006, 46(1): 60-65.
马玉真,陶立英,王新华. 计算机视觉技术的应用[J]. *试验技术与试验机*, 2006, 46(1): 60-65.
- [4] Gao X, Zhang T. Robust RGB-D simultaneous localization and mapping using planar point features[J]. *Robotics and Autonomous Systems*, 2015, 72: 1-14.
- [5] Xu J, Zhang S. Status, challenges, and future perspectives of fringe projection profilometry[J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2020, 135: 106193.
- [6] Guo W B, Zhang Q C, Wu Z J. Real-time three-dimensional imaging technique based on phase-shift fringe analysis: a review[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2021, 58(8): 0800001.
郭文博,张启灿,吴周杰. 基于相移条纹分析的实时三维成像技术发展综述[J]. *激光与光电子学进展*, 2021, 58(8): 0800001.
- [7] Pavlidis G, Koutsoudis A, Arnaoutoglou F, et al. Methods for 3D digitization of cultural heritage[J]. *Journal of Cultural Heritage*, 2007, 8(1): 93-98.
- [8] Wang W G, Hu Z Y, Shun Z Y. 3D shape measurement based on computer vision[C]// *Proceedings of International Conference on Machine Learning and Cybernetics*, November 4-5, 2002, Beijing, China. New York: IEEE Press, 2002: 910-914.
- [9] Baqersad J, Poozesh P, Niezrecki C, et al. Photogrammetry and optical methods in structural dynamics: a review[J]. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2017, 86: 17-34.
- [10] Do P N B, Nguyen Q C. A review of stereo-photogrammetry method for 3-D reconstruction in computer vision[C]// *2019 19th International Symposium on Communications and Information Technologies (ISCIT)*, September 25-27, 2019, Ho Chi Minh City, Vietnam. New York: IEEE Press, 2019: 138-143.
- [11] Zhang D H, Liang J, Guo C. Comparison method for CCD camera accuracy in photography measurement[J]. *Journal of Applied Optics*, 2009, 30(2): 279.
张德海,梁晋,郭成. 摄影测量中 CCD 相机精度对比方法研究[J]. *应用光学*, 2009, 30(2): 279.
- [12] Sims-Waterhouse D, Piano S, Leach R. Verification of micro-scale photogrammetry for smooth three-dimensional object measurement[J]. *Measurement Science and Technology*, 2017, 28(5): 055010.
- [13] Atkinson K B, Newton I. The photogrammetric society: 1952-2001[J]. *The Photogrammetric Record*,

- 2002, 17(100): 577-600.
- [14] Poulin-Girard A S, Thibault S, Laurendeau D. Influence of camera calibration conditions on the accuracy of 3D reconstruction[J]. *Optics Express*, 2016, 24(3): 2678-2686.
- [15] Chang C X, Zhang Z H, Gao N, et al. Improved infrared phase measuring deflectometry method for the measurement of discontinuous specular objects[J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2020, 134: 106194.
- [16] Wong K Y K, Mendonca P R S, Cipolla R. Camera calibration from surfaces of revolution[J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2003, 25(2): 147-161.
- [17] Hu G Y, He P A, Wang B L, et al. Overview of camera calibration in visual measurement[J]. *Optics & Optoelectronic Technology*, 2004, 2(3): 9-12.
胡国元, 何平安, 王宝龙, 等. 视觉测量中的相机标定问题[J]. *光学与光电技术*, 2004, 2(3): 9-12.
- [18] Guo Y, Yang H, Yang Z J, et al. Distortion measurement of lens in CCD camera system[J]. *Journal of Applied Optics*, 2008, 29(2): 279-282.
郭羽, 杨红, 杨照金, 等. CCD摄像系统镜头的畸变测量[J]. *应用光学*, 2008, 29(2): 279-282.
- [19] Song L M, Wang M P, Lu L, et al. High precision camera calibration in vision measurement[J]. *Optics & Laser Technology*, 2007, 39(7): 1413-1420.
- [20] Orteu J J, Garric V, Devy M. Camera calibration for 3D reconstruction: application to the measurement of 3D deformations on sheet metal parts[J]. *Proceedings of SPIE*, 1997, 3101: 252-263.
- [21] Sun Q, Wang X Y, Xu J P, et al. Camera self-calibration with lens distortion[J]. *Optik*, 2016, 127(10): 4506-4513.
- [22] Gao X, Zhang T, Liu Y. Visual SLAM fourteen lectures: from theory to practice[M]. Beijing: Publishing House of Electronics industry, 2017: 97-104.
高翔, 张涛, 刘毅. 视觉 SLAM 十四讲: 从理论到实践[M]. 北京: 电子工业出版社, 2017: 97-104.
- [23] Hartley R, Zisserman A. Multiple view geometry in computer vision[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2004.
- [24] Zhang G J. Vision measurement[M]. Beijing: Science Press, 2008.
- [25] Juarez-Salazar R, Zheng J, Diaz-Ramirez V H. Distorted pinhole camera modeling and calibration[J]. *Applied Optics*, 2020, 59(36): 11310-11318.
- [26] Evagorou E, Mettas C, Agapiou A, et al. Digital camera calibration for cultural heritage documentation: the case study of a mass digitization project of religious monuments in Cyprus[J]. *European Journal of Remote Sensing*, 2021, 54(1): 6-17.
- [27] Ghosh P K, Mudur S P. Three-dimensional computer vision: a geometric viewpoint[J]. *The Computer Journal*, 1995, 38(1): 85-86.
- [28] Zhang Z Y. A flexible new technique for camera calibration[J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2000, 22(11): 1330-1334.
- [29] He H, Li H Y, Huang Y B, et al. A novel efficient camera calibration approach based on K-SVD sparse dictionary learning[J]. *Measurement*, 2020, 159: 107798.
- [30] Heikkila J, Silven O. A four-step camera calibration procedure with implicit image correction[C]// *Proceedings of IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, June 17-19, 1997, San Juan, PR, USA. New York: IEEE Press, 1997: 1106-1112.
- [31] Kim J S, Gurdjos P, Kweon I S. Geometric and algebraic constraints of projected concentric circles and their applications to camera calibration[J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2005, 27(4): 637-642.
- [32] He D, Liu X L, Peng X, et al. Eccentricity error identification and compensation for high-accuracy 3D optical measurement[J]. *Measurement Science & Technology*, 2013, 24(7): 075402.
- [33] An J J, Gao N, Chen C, et al. Correcting method and evaluation of eccentricity error of circle target[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2017, 54(4): 041203.
安晶晶, 高楠, 陈超, 等. 圆环标识的离心偏差校正方法与评价[J]. *激光与光电子学进展*, 2017, 54(4): 041203.
- [34] Schmalz C, Forster F, Angelopoulou E. Camera calibration: active versus passive targets[J]. *Optical Engineering*, 2011, 50(11): 113601.
- [35] Abdel-Aziz Y I, Karara H M, Hauck M. Direct linear transformation from comparator coordinates into object space coordinates in close-range photogrammetry[J]. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 2015, 81(2): 103-107.
- [36] Yakimovsky Y, Cunningham R. A system for extracting three-dimensional measurements from a stereo pair of TV cameras[J]. *Computer Graphics and Image Processing*, 1978, 7(2): 195-210.
- [37] Sun J, Wang P, Qin Z K, et al. Overview of camera calibration for computer vision[C]// *Proceeding of the*

- 11th World Congress on Intelligent Control and Automation, June 29-July 4, 2014, Shenyang, China. New York: IEEE Press, 2014: 86-92.
- [38] Ye F, Wang M, Chen J D, et al. Camera nonlinear distortion correction based on coplanar points [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2015, 23(10): 2962-2970.
叶峰, 王敏, 陈剑东, 等. 共面点的摄像机非线性畸变校正[J]. *光学精密工程*, 2015, 23(10): 2962-2970.
- [39] Tsai R Y. A versatile camera calibration technique for high-accuracy 3D machine vision metrology using off-the-shelf TV cameras and lenses[J]. *IEEE Journal on Robotics and Automation*, 1987, 3(4): 323-344.
- [40] Zhang Z Y. Motion and structure from two perspective views: from essential parameters to Euclidean motion through the fundamental matrix [J]. *Journal of the Optical Society of America A*, 1997, 14(11): 2938-2950.
- [41] Sid-Ahmed M A, Boraie M T. Dual camera calibration for 3-D machine vision metrology [J]. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 1990, 39(3): 512-516.
- [42] Weng J, Cohen P, Herniou M. Calibration of stereo cameras using a non-linear distortion model (CCD sensory)[C]//[1990] Proceedings. 10th International Conference on Pattern Recognition, June 16-21, 1990, Atlantic City, NJ, USA. New York: IEEE Press, 1990: 246-253.
- [43] Martins H A, Birk J R, Kelley R B. Camera models based on data from two calibration planes [J]. *Computer Graphics and Image Processing*, 1981, 17(2): 173-180.
- [44] Jiang G, Quan L. Detection of concentric circles for camera calibration [C] // Tenth IEEE International Conference on Computer Vision (ICCV'05), October 17-21, 2005, Beijing, China. New York: IEEE Press, 2005: 333-340.
- [45] Zhang Z H, Wang S, Wang Y Y, et al. Method for extracting the center of circular coded target based on radial straight line fitting of circular coding [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2020, 57(7): 071203.
张宗华, 王森, 王宇莹, 等. 基于编码环带径向直线拟合的圆环编码标志点中心提取方法[J]. *激光与光电子学进展*, 2020, 57(7): 071203.
- [46] Lu X D, Xue J P, Zhang Q C. High camera calibration method based on true coordinate computation of circle center [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2020, 47(3): 0304008.
卢晓冬, 薛俊鹏, 张启灿. 基于圆心真实图像坐标计算的高精度相机标定方法[J]. *中国激光*, 2020, 47(3): 0304008.
- [47] Xue J P, Su X Y, Dou Y F. A concentric circles and wedge grating-based camera self-calibration method [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2012, 39(3): 0308002.
薛俊鹏, 苏显渝, 窦蕴甫. 基于同心圆光栅和楔形光栅的摄像机自标定方法[J]. *中国激光*, 2012, 39(3): 0308002.
- [48] Huang L, Zhang Q C, Asundi A. Camera calibration with active phase target: improvement on feature detection and optimization[J]. *Optics Letters*, 2013, 38(9): 1446-1448.
- [49] Ma M C, Chen X C, Wang K Y. Camera calibration by using fringe patterns and 2D phase-difference pulse detection[J]. *Optik*, 2014, 125(2): 671-674.
- [50] Sagawa R, Takatsuji M, Echigo T, et al. Calibration of lens distortion by structured-light scanning [C] // 2005 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, August 2-6, 2005, Edmonton, AB, Canada. New York: IEEE Press, 2005: 832-837.
- [51] Liu Y K, Su X Y. Camera calibration with planar crossed fringe patterns [J]. *Optik*, 2012, 123(2): 171-175.
- [52] Große M. Camera calibration using time-coded planar patterns [J]. *Optical Engineering*, 2012, 51(8): 083604.
- [53] Xue J P, Su X Y, Xiang L Q, et al. Using concentric circles and wedge grating for camera calibration [J]. *Applied Optics*, 2012, 51(17): 3811-3816.
- [54] Xu Y J, Gao F, Ren H Y, et al. An iterative distortion compensation algorithm for camera calibration based on phase target [J]. *Sensors*, 2017, 17(6): 1188.
- [55] Yu J, Chen C, Gao N, et al. Camera calibration based on phase target [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2018, 55(11): 111203.
于瑾, 陈超, 高楠, 等. 基于相位标靶的相机标定[J]. *激光与光电子学进展*, 2018, 55(11): 111203.
- [56] Bell T, Xu J, Zhang S. Method for out-of-focus camera calibration [J]. *Applied Optics*, 2016, 55(9): 2346-2352.
- [57] Wang Y W, Chen X C, Tao J Y, et al. Accurate feature detection for out-of-focus camera calibration [J]. *Applied Optics*, 2016, 55(28): 7964-7971.
- [58] Faugeras O D, Quan L, Strum P F. Self-calibration of a 1D projective camera and its application to the self-calibration of a 2D projective camera [J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine*

- Intelligence, 2000, 22(10): 1179-1185.
- [59] Pollefeys M, van Gool L. A stratified approach to metric self-calibration [C] // Proceedings of IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, June 17-19, 1997, San Juan, PR, USA. New York: IEEE Press, 1997: 407-412.
- [60] Pollefeys M, Koch R, van Gool L. Self-calibration and metric reconstruction inspite of varying and unknown intrinsic camera parameters[J]. International Journal of Computer Vision, 1999, 32(1): 7-25.
- [61] Xu S, Sun XX, Liu X, et al. Geometry method of camera self-calibration based on a rectangle[J]. Acta Optica Sinica, 2014, 34(11): 1115002.
徐嵩, 孙秀霞, 刘希, 等. 基于矩形的摄像机自标定几何方法[J]. 光学学报, 2014, 34(11): 1115002.
- [62] Quan L. Self-calibration of an affine camera from multiple views[J]. International Journal of Computer Vision, 1996, 19(1): 93-105.
- [63] Faugeras O D, Luong Q T, Maybank S J. Camera self-calibration: theory and experiments[M] // Sandini G. Computer vision-ECCV'92. Lecture notes in computer science. Heidelberg: Springer, 1992, 588: 321-334.
- [64] Faugeras O D. What can be seen in three dimensions with an uncalibrated stereo rig? [M] // Sandini G. Computer vision-ECCV'92. Lecture notes in computer science. Heidelberg: Springer, 1992, 588: 563-578.
- [65] Maybank S J, Faugeras O D. A theory of self-calibration of a moving camera [J]. International Journal of Computer Vision, 1992, 8(2): 123-151.
- [66] Lei C, Wu F C, Hu Z Y. Kruppa equations and camera self-calibration[J]. Acta Automatica Sinica, 2001, 27(5): 621-630.
雷成, 吴福朝. Kruppa 方程与摄像机标定[J]. 自动化学报, 2001, 27(5): 621-630.
- [67] Jin J, Li X F. Efficient camera self-calibration method based on the absolute dual quadric [J]. Journal of the Optical Society of America A, 2013, 30(3): 287-292.
- [68] Golub G H, van Loan C F. Matrix computations[J]. The Mathematical Gazette, 1996, 47(5): 392-396.
- [69] Faugeras O D. Stratification of three-dimensional vision: projective, affine, and metric representations: errata[J]. Journal of the Optical Society of America A, 1995, 12(7): 1606.
- [70] Wang G H, Wu Q M J. Quasi-perspective projection model: theory and application to structure and motion factorization from uncalibrated image sequences [J]. International Journal of Computer Vision, 2010, 87(3): 213-234.
- [71] Zhang Z Y, Xu G. A unified theory of uncalibrated stereo for both perspective and affine cameras [J]. Journal of Mathematical Imaging and Vision, 1998, 9(3): 213-229.
- [72] Triggs B. Autocalibration and the absolute quadric [C] // Proceedings of IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, June 17-19, San Juan, Puerto Rico. New York: IEEE Press, 1997: 604-614.
- [73] Zhu J, Li X F, Xu Y X. Camera calibration technique based on active vision [J]. Acta Optica Sinica, 2010, 30(5): 1297-1303.
朱嘉, 李醒飞, 徐颖欣. 摄像机的一种主动视觉标定方法[J]. 光学学报, 2010, 30(5): 1297-1303.
- [74] Moons T, van Gool L, Proesmans M, et al. Affine reconstruction from perspective image pairs with a relative object-camera translation in between [J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 1996, 18(1): 77-83.
- [75] de Agapito L, Hartley R I, Hayman E. Linear self-calibration of a rotating and zooming camera [C] // Proceedings of 1999 IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (Cat. No PR00149), June 23-25, 1999, Fort Collins, CO, USA. New York: IEEE Press, 1999: 15-21.
- [76] Hartley R I. Self-calibration of stationary cameras [J]. International Journal of Computer Vision, 1997, 22(1): 5-23.
- [77] Ma S D. A self-calibration technique for active vision systems [J]. IEEE Transactions on Robotics and Automation, 1996, 12(1): 114-120.
- [78] Lei C, Wu F C, Hu Z Y. A new camera self-calibration method based on active vision system [J]. Chinese Journal of Computers, 2000, 23(11): 1130-1139.
雷成, 吴福朝, 胡占义. 一种新的基于主动视觉系统的摄像机自标定方法 [J]. 计算机学报, 2000, 23(11): 1130-1139.
- [79] Li H, Wu F C, Hu Z Y. A new linear camera self-calibration technique [J]. Chinese Journal of Computers, 2000, 23(11): 1121-1129.
李华, 吴福朝, 胡占义. 一种新的线性摄像机自标定方法 [J]. 计算机学报, 2000, 23(11): 1121-1129.
- [80] Wu F C, Hu Z Y. A new theory and algorithm of linear camera self calibration [J]. Chinese Journal of Computers, 2001, 24(11): 1221-1235.

- 吴福朝, 胡占义. 摄像机自标定的线性理论与算法[J]. 计算机学报, 2001, 24(11): 1221-1235.
- [81] Wu F C, Hu Z Y. Linear determination of the infinite homography and camera self-calibration [J]. Acta Automatica Sinica, 2002, 28(4): 488-496.
- 吴福朝, 胡占义. 线性确定无穷远平面的单应矩阵和摄像机自标定[J]. 自动化学报, 2002, 28(4): 488-496.
- [82] Li H, Hu Z Y. A linear camera self-calibration technique based on projective reconstruction [J]. Journal of Software, 2002, 13(12): 2286-2296.
- 李华, 胡占义. 基于射影重建的线性摄像机自标定方法[J]. 软件学报, 2002, 13(12): 2286-2296.
- [83] Sun W, He X Y, Zheng X. Three-dimensional displacement measurement based on single CCD camera[J]. Acta Optica Sinica, 2008, 28(9): 1723-1729.
- 孙伟, 何小元, 郑翔. 基于单摄像机的三维位移测试方法[J]. 光学学报, 2008, 28(9): 1723-1729.
- [84] Gu G H, Wang J J, Chen Q, et al. Camera parameter calibration based on two-dimensional rotating platform[J]. Optics and Precision Engineering, 2017, 25(7): 1890-1899.
- 顾国华, 王佳节, 陈钱, 等. 二维旋转平台下的相机参数标定[J]. 光学精密工程, 2017, 25(7): 1890-1899.
- [85] Xu Q Y, Yang L H, Niu Z Y, et al. High-accuracy calibration of multi-camera positioning system based on precision angle reference[J]. Acta Optica Sinica, 2019, 39(1): 0115001.
- 徐秋宇, 杨凌辉, 牛志远, 等. 精密角度基准下的多相机定位系统高精度标定[J]. 光学学报, 2019, 39(1): 0115001.
- [86] Cai P, Li X Y, Tang Y J, et al. Improved distortion correction method for spacial large aperture tracking cameras[J]. Optics and Precision Engineering, 2019, 27(10): 2272-2279.
- 蔡萍, 李潇雁, 唐玉俊, 等. 改进的空间大口径追踪相机畸变校正[J]. 光学精密工程, 2019, 27(10): 2272-2279.
- [87] Yuan M, Su X Y, Liu X Q. Analysis of factors on the precision of the camera calibration[J]. Optics & Optoelectronic Technology, 2010, 8(4): 18-21.
- 袁铭, 苏显渝, 刘晓青. 影响摄像机标定精度的因素分析[J]. 光学与光电技术, 2010, 8(4): 18-21.
- [88] Xu Q Y, Yao H, Che R S. Online calibration of stereo vision measurement system [J]. Acta Optica Sinica, 2009, 29(6): 1546-1551.
- 徐巧玉, 姚怀, 车仁生. 立体视觉测量系统现场校准技术[J]. 光学学报, 2009, 29(6): 1546-1551.
- [89] Sun J H, Wu Z Y, Liu Q Z, et al. Field calibration of stereo vision sensor with large FOV[J]. Optics and Precision Engineering, 2009, 17(3): 633-640.
- 孙军华, 吴子彦, 刘谦哲, 等. 大视场双目视觉传感器的现场标定[J]. 光学精密工程, 2009, 17(3): 633-640.
- [90] Chen H, Ye D, Che R S, et al. Stereo camera calibration based on accurate control points [J]. Optics and Precision Engineering, 2006, 14(5): 903-909.
- 陈华, 叶东, 车仁生, 等. 基于精确控制点的立体像机校准技术[J]. 光学精密工程, 2006, 14(5): 903-909.
- [91] Ye D, Xu Q Y, Che R S. Camera calibration technique for vision measurement system[J]. Optics and Precision Engineering, 2006, 14(5): 883-890.
- 叶东, 徐巧玉, 车仁生. 视觉测量系统的相机校准[J]. 光学精密工程, 2006, 14(5): 883-890.
- [92] Ye D, Liu C Y, Che R S, et al. Dummy solid camera calibration technology using genetic algorithm [J]. Optics and Precision Engineering, 2006, 14(3): 485-489.
- 叶东, 刘长英, 车仁生, 等. 基于遗传算法的像机虚拟立体校准技术研究[J]. 光学精密工程, 2006, 14(3): 485-489.
- [93] Yang B W, Zhang L Y, Ye N, et al. Camera calibration technique of wide-area vision measurement [J]. Acta Optica Sinica, 2012, 32(9): 0915001.
- 杨博文, 张丽艳, 叶南, 等. 面向大视场视觉测量的摄像机标定技术[J]. 光学学报, 2012, 32(9): 0915001.
- [94] Yan A Q, Yang J F, Cao J Z, et al. Optical system design of space fisheye camera [J]. Acta Optica Sinica, 2011, 31(10): 1022004.
- 闫阿奇, 杨建峰, 曹剑中, 等. 航天鱼眼相机光学系统设计的研究[J]. 光学学报, 2011, 31(10): 1022004.
- [95] Niu Z Q, Gao N, Zhang Z H, et al. 3D shape measurement of discontinuous specular objects based on advanced PMD with bi-telecentric lens[J]. Optics Express, 2018, 26(2): 1615-1632.
- [96] Silvatti A P, Salve Dias F A, Cerveri P, et al. Comparison of different camera calibration approaches for underwater applications[J]. Journal of Biomechanics, 2012, 45(6): 1112-1116.
- [97] Hu X W, Wang G J, Wang J N, et al. A robust and accurate calibration method for out-of-focus camera [J]. Electronic Imaging, 2018, 2018(2): 1-5.
- [98] Liao H Y, Chen Z, Zhang X M. Calibration of camera with small FOV and DOF telecentric lens

- [C]//2013 IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics (ROBIO), December 12-14, 2013, Shenzhen, China. New York: IEEE Press, 2013: 498-503.
- [99] Lu L J, Liu M, Shi Y. Correction method of image distortion of fisheye lens [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2019, 48(9): 0926002.
吕丽军, 刘盟, 侍业. 鱼镜头图像畸变的校正方法 [J]. *红外与激光工程*, 2019, 48(9): 0926002.
- [100] Kim H, Kim D, Paik J, et al. Automatic estimation of spatially varying focal length for correcting distortion in fisheye lens images [J]. *IEIE Transactions on Smart Processing and Computing*, 2013, 2(6): 339-344.
- [101] Schneider D, Schwalbe E, Maas H G. Validation of geometric models for fisheye lenses [J]. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 2009, 64(3): 259-266.
- [102] Obukhova N A, Motyko A A, Pozdeev A A. Research and development of methods for endoscopic (medical) images enhancement [J]. *Journal of the Russian Universities Radioelectronics*, 2019 (2): 22-30.
- [103] Zhou W S, Weng J W, Peng J Z, et al. Wide-angle lenses distortion calibration using phase demodulation of phase-shifting fringe-patterns [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2020, 49(6): 20200039.
周维帅, 翁嘉文, 彭军政, 等. 利用相移条纹相位解调的广角镜头畸变校正 [J]. *红外与激光工程*, 2020, 49(6): 20200039.
- [104] Kakani V, Kim H, Kumbham M, et al. Feasible self-calibration of larger field-of-view (FOV) camera sensors for the advanced driver-assistance system (ADAS) [J]. *Sensors*, 2019, 19(15): 3369.
- [105] Kim J S, Kanade T. Multiaperture telecentric lens for 3D reconstruction [J]. *Optics Letters*, 2011, 36(7): 1050-1052.
- [106] Li D, Tian J D. An accurate calibration method for a camera with telecentric lenses [J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2013, 51(5): 538-541.
- [107] Liu H B, Lin H J, Yao L S. Calibration method for projector-camera-based telecentric fringe projection profilometry system [J]. *Optics Express*, 2017, 25(25): 31492-31508.
- [108] Fryer J G, Fraser C S. On the calibration of underwater cameras [J]. *The Photogrammetric Record*, 2006, 12(67): 73-85.
- [109] Li S Q, Xie X P, Zhuang Y J. Research on the calibration technology of an underwater camera based on equivalent focal length [J]. *Measurement*, 2018, 122: 275-283.
- [110] Konovalenko I A, Sidorchuk D S, Zenkin G M. Analysis and compensation of geometric distortions, appearing when observing objects under water [J]. *Pattern Recognition and Image Analysis*, 2018, 28(3): 379-392.
- [111] Schettini R, Corchs S. Underwater image processing: state of the art of restoration and image enhancement methods [J]. *EURASIP Journal on Advances in Signal Processing*, 2010, 2010: 746052.
- [112] Zhao Y Q, Dai H M, Shen L H, et al. Review of underwater polarization clear imaging methods [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2020, 49(6): 20190574.
赵永强, 戴慧敏, 申凌皓, 等. 水下偏振清晰成像方法综述 [J]. *红外与激光工程*, 2020, 49(6): 20190574.
- [113] Shortis M. Calibration techniques for accurate measurements by underwater camera systems [J]. *Sensors*, 2015, 15(12): 30810-30826.
- [114] Wu X J, Li H S. A simple and comprehensive model for underwater image restoration [C] // 2013 IEEE International Conference on Information and Automation (ICIA), August 26-28, 2013, Yinchuan, China. New York: IEEE Press, 2013: 699-704.
- [115] Guo T, Da F P, Fang X. Camera calibration under small field of view [J]. *Chinese Journal of 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.
- [116] Yang H, Cai N, Lin B, et al. Defocus camera calibration based on sinusoidal phase coding [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2018, 47(7): 0715002.
杨浩, 蔡宁, 林斌, 等. 基于正弦相位编码的相机离焦标定 [J]. *光子学报*, 2018, 47(7): 0715002.
- [117] An Y T, Bell T, Li B W, et al. Method for large-range structured light system calibration [J]. *Applied Optics*, 2016, 55(33): 9563-9572.
- [118] Guo G D, Zhang N. A survey on deep learning based face recognition [J]. *Computer Vision and Image Understanding*, 2019, 189: 102805.
- [119] Bai X F, Gao N, Zhang Z H, et al. 3D palmprint identification combining blocked ST and PCA [J]. *Pattern Recognition Letters*, 2017, 100: 89-95.
- [120] Wang X, Gai S Y, Da F P. Fusion of geometric and orientation information for 3D palmprint recognition [J]. *Journal of Graphics*, 2020, 41(3): 390-398.
王曦, 盖绍彦, 达飞鹏. 融合几何信息和方向信息的三维掌纹识别方法 [J]. *图学学报*, 2020, 41(3): 390-398.
- [121] Feng S J, Zuo C, Zhang L, et al. Generalized framework for non-sinusoidal fringe analysis using

- deep learning[J]. *Photonics Research*, 2021, 9(6): 1084-1098.
- [122] Qian J M, Feng S J, Li Y X, et al. Single-shot absolute 3D shape measurement with deep-learning-based color fringe projection profilometry[J]. *Optics Letters*, 2020, 45(7): 1842-1845.
- [123] Zhang L, Chen Q, Zuo C, et al. High-speed high dynamic range 3D shape measurement based on deep learning[J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2020, 134: 106245.