

激光与光电子学进展

单相机三维视觉成像技术研究进展

刘兴盛[†], 李安虎^{*†}, 邓兆军, 陈昊

同济大学机械与能源工程学院, 上海 201804

摘要 机器视觉应用场景复杂化和功能需求多元化给三维成像技术带来巨大挑战。针对复杂环境及受限空间的目标重建和场景感知问题, 结构简单且性能可靠的单相机三维视觉成像技术能够提供重要的解决途径。在阐明单相机三维立体视觉成像理论模型的基础上, 根据相机运动情况以及采用的反射、折射或衍射等附加光学元件的情况, 分类介绍了单相机三维视觉成像系统组成、基本原理和实现方法。从视场范围、空间分辨率、视角灵活性、动态响应性、环境适应性等角度, 分析了现有单相机三维视觉成像方法的优越性和局限性。围绕三维重建精度及成像质量提升问题, 回顾了相机与附加光学元件未对准参数的主要标定方法。结合单相机三维视觉成像的技术挑战和应用前景, 展望了其在实现大视场高分辨率、高动态高实时性、复杂环境适应性等方面的发展方向。

关键词 机器视觉; 三维成像; 立体视觉; 相机运动; 光学元件; 参数标定

中图分类号 O439

文献标志码 A

DOI: 10.3788/LOP202259.1415007

Advances in Three-Dimensional Imaging Technologies Based on Single-Camera Stereo Vision

Liu Xingsheng[†], Li Anhu^{*†}, Deng Zhaojun, Chen Hao

School of Mechanical Engineering, Tongji University, Shanghai 201804, China

Abstract Three-dimensional (3D) imaging faces challenges due to machine vision requiring complicated applications and diverse functionalities. Due to its compact structure and reliable performance, 3D imaging using single-camera stereo vision (SSV) offers a considerable approach to object reconstruction and situational awareness under spatially-limited conditions. In this paper, we demonstrated the theoretical basis for SSV-based 3D imaging. Next, we introduced 3D imaging techniques based on known or unknown camera motion, and those using reflective, refractive, or diffractive optical elements based on system setup, basic principle, and implementation methods. Furthermore, we analyzed existing methods based on their strengths and shortcomings in the field of view, spatial resolution, viewpoint flexibility, and dynamic response. Particularly, the calibration methods of misalignment parameters between the camera and optical element are reviewed to enhance 3D reconstruction accuracy. In addition to the technical challenges and potential applications, we discussed the development trends of SSV-based 3D imaging toward a wide field of view, high resolution, high dynamic and real-time capability, and strong environmental adaptability.

Key words machine vision; three-dimensional imaging; stereo vision; camera motion; optical element; parameter calibration

1 引言

机器视觉作为光学成像、信息处理、机器控制等诸多学科的交叉领域, 在智能制造带来的产业变革中承担着支撑性作用。由于光电成像器件和图像处理算法的迅速发展, 机器视觉技术在二维场景下的几何测量、

缺陷检测、目标定位等方面的应用趋于成熟。随着机器作业场景从简单二维平面转向复杂三维空间, 如何利用视觉系统获取的二维图像信息提取机器在非结构化空间内自主作业所需的三维目标或场景信息, 成为机器视觉领域的重点研究方向^[1-3]。

从视觉原理和成像体制来看, 现有的三维视觉成

收稿日期: 2022-03-30; 修回日期: 2022-04-22; 录用日期: 2022-05-11

基金项目: 国家自然科学基金(61975152)

通信作者: lah@tongji.edu.cn

[†] 共同第一作者

像技术主要分为两类:主动式的结构光视觉方法和被动的立体视觉方法。结构光视觉系统通常利用投影器向目标投射点状、线状或条纹状的编码照明图案,通过相机拍摄该照明图案经过目标表面调制之后的图像,再结合模式分析与成像模型来重建目标的表面形貌^[4-5]。采用空间/频率复用或时间复用等不同的编码策略,结构光三维成像技术可从单帧或多帧图像恢复三维轮廓形貌。前者以其在功耗、成本、效率等方面的优势,能适应精度要求不高的消费级应用场景;而后者具有高精度、强鲁棒性、高动态范围等特点,在工业质量控制、生物医学检测、文物逆向工程等领域呈现重要的应用价值^[6-8]。但是,结构光三维成像技术普遍依赖高性能投影器件和复合编码方法来解决大范围、高精度、实时性等指标之间的矛盾,要求较高的系统复杂度和软硬件成本,也易受环境变化和视角遮挡的影响。相较而言,立体视觉系统根据相机采集的单幅或多幅强度图像即可恢复目标物体的三维信息,具有结构组成简单、无损伤探测、视场范围广、成像效率高、光谱及纹理信息丰富、性价比高等特点,在机器人自主导航、飞行器定位引导、空间目标跟踪等应用场合呈现重要的技术优势^[9-11]。

立体视觉三维成像技术通常采用两台相机构建双目视觉系统或采用多台相机形成多目视觉系统^[12-13]。双目或多目视觉系统均可利用相机分布感知策略,从不同成像视角同步拍摄目标场景的图像,通过图像校正与立体匹配算法实现不同视角的视差估计,最后基于三角测量原理恢复目标场景的三维信息。关于双目或多目视觉三维重建理论及算法的研究渐趋成熟^[14-15],但这类系统要求较大的物理结构和充足的布置空间以实现高质量的三维重建。在机器人引导定位、医学内窥成像、无人机环境感知等应用场景^[3,16],成像系统的结构紧凑性和功能集成性往往面临严苛的要求,在保证足够精度(一般为毫米级到亚毫米级)及效率的同时降低系统体积、质量和成本,具有重要的研究意义和实用价值。为了解决空间受限条件下目标场景的三维感知难题,许多研究尝试利用单台相机实现立体视觉成像功能,由此发展出基于相机未知/已知运动、基于附加光学元件、基于深度学习算法等多类三维重建技术^[17-19]。前两类技术从成像系统及数学模型层面出发,解决如何通过单相机实现多视角图像获取和三维信息重建的关键问题;第三类技术则聚焦在软件算法层面,其关键问题是如何根据固定视角的单张图像恢复三维空间结构或场景模型。目前已有大量围绕这些关键问题的研究工作,为单相机三维视觉成像技术的开发与应用奠定了良好基础。

本文旨在通过介绍单相机三维视觉领域的研究方向和重要成果,推动单相机三维成像技术的发展及其在智能制造、医学观测、自主导航等领域的应用。围绕理论模型、系统组成、基本原理、参数标定等方面,系统

地阐述了单相机三维视觉成像技术的研究现状与最新进展,结合典型应用分析了不同单相机视觉系统及三维成像方法的优越性和局限性,进而探讨了单相机三维视觉成像技术的发展趋势和应用前景。

2 单相机三维视觉成像模型

单相机视觉系统可利用遮挡、阴影、聚焦/离焦、目标几何特征、环境光照变化等已知线索实现空间目标或场景重建^[20-22],也可通过多视角图像序列提供的射线几何关系实现三维立体重建^[23]。多视几何理论无需依赖目标或场景的任何先验信息,在非结构化环境下具有卓越的灵活性和适应性,故能满足工业、医学、测绘等诸多领域的应用需求^[24-25]。作为单相机三维视觉成像技术的理论基础,本小节简要介绍了通用的相机成像模型和多视几何模型。

2.1 相机成像模型

相机在特定视角下拍摄三维空间物体的数字图像,包含从三维物方空间投影到二维像方平面的几何映射关系。主流的相机成像模型遵循中心透视投影关系,即假设来自物体的光线均由透镜汇聚至光心(即投影中心)而到达像平面。相机成像模型涉及多个坐标系之间的相互转换,包括世界坐标系 $O_w-X_wY_wZ_w$ 、相机坐标系 $O_c-X_cY_cZ_c$ 、图像坐标系 $o-xy$ 、像素坐标系 $p-uv$ 及归一化图像坐标系 $o_n-x_ny_n$,如图 1 所示。

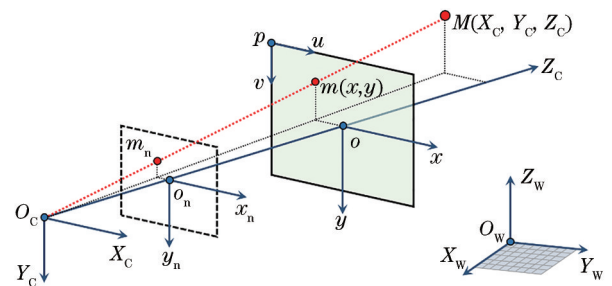


图 1 相机成像模型及坐标系定义

Fig. 1 Camera model with definition of coordinate systems

给定任意物点 M ,在相机坐标系下三维坐标记为 $[X_c, Y_c, Z_c]^T$,其对应像点 m 在图像坐标系和像素坐标系下二维坐标分别记为 $[x, y]^T$ 和 $[u, v]^T$ 。结合图 1,像点 m 的像素坐标 $[u, v]^T$ 、图像坐标 $[x, y]^T$ 、归一化图像坐标 $[x_n, y_n]^T$ 与物点 M 的三维坐标满足^[14,23]:

$$\begin{bmatrix} u \\ v \\ 1 \end{bmatrix} = \mathbf{A} \begin{bmatrix} x_n \\ y_n \\ 1 \end{bmatrix} = \frac{\mathbf{A}}{f} \begin{bmatrix} x \\ y \\ f \end{bmatrix} = \frac{\mathbf{A}}{Z_c} \begin{bmatrix} X_c \\ Y_c \\ Z_c \end{bmatrix} = \frac{\mathbf{A}}{Z_c} \left(\mathbf{R}_{cw} \begin{bmatrix} X_w \\ Y_w \\ Z_w \end{bmatrix} + \mathbf{T}_{cw} \right), \quad (1)$$

式中: \mathbf{R}_{cw} 和 \mathbf{T}_{cw} 分别为从世界坐标系到相机坐标系的

旋转矩阵和平移向量; \mathbf{A} 表示相机的内部参数矩阵, 其表达式为

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} f_u & \gamma & u_0 \\ 0 & f_v & v_0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f/d_u & \gamma & u_0 \\ 0 & f/d_v & v_0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad (2)$$

式中: f_u 和 f_v 分别表示 u 轴和 v 轴方向的等效焦距; $[u_0, v_0]^T$ 为主点 o 的像素坐标; γ 为相对倾斜因子; f 为相机镜头的实际焦距; d_u 和 d_v 分别表示 u 轴和 v 轴方向的像素间距。由于镜头设计的复杂性和工艺水平等因素的影响, 实际上相机无法严格满足透视投影成像模型, 还需要考虑镜头的前两项径向畸变^[26-27]。

2.2 多视几何模型

多视几何是从若干不同视角的二维图像序列恢复三维场景结构模型的理论和方法基础, 其基本任务包括建立图像匹配关系并重构目标空间信息。对于单相机视觉系统而言, 相机内部参数在多视角图像获取过程中始终保持不变, 多视角图像序列的同名点匹配关系主要取决于不同视角之间的相对位姿变换。给定几幅不同视角的图像, 物点 M 在图像 I_i 上形成的像点记为 m_i , 根据对极几何可建立两两图像之间的极线约束关系, 如图 2(a) 所示, 其中 O_{C_i} 表示相机光心位置; e_{ij} 为 O_{C_i} 与 O_{C_j} 连线在 I_i 图像平面的交点, 即极点; O_{C_i}, O_{C_j} 与 M 构成极平面, 其与 I_i 图像平面的交线 l_{ij} 即为对应 m_i 的极线。一幅图像中任意像点在另一幅图像中对应的同名像点可沿极

线搜索得到, 这种关系由本质矩阵或基础矩阵描述^[15, 23]。

理论上, 从不同视角下产生的反投影光线 R_i 应相交于共同的物点 M , 由此可建立关于其空间坐标 $[X_w, Y_w, Z_w]^T$ 的线性方程组^[15, 23], 即

$$\begin{bmatrix} u_i p_{31} - p_{11} & u_i p_{32} - p_{12} & u_i p_{33} - p_{13} \\ v_i p_{31} - p_{21} & v_i p_{32} - p_{22} & v_i p_{33} - p_{23} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_w \\ Y_w \\ Z_w \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} p_{14} - u_i p_{34} \\ p_{24} - v_i p_{34} \end{bmatrix}, \quad (3)$$

式中: $[u_i, v_i]^T$ 为像点 m_i 的像素坐标; p 为当前视角下相机投影矩阵 \mathbf{P} 的元素, 其下标表示所在行和列。投影矩阵 \mathbf{P} 与相机内参矩阵 \mathbf{A} 及坐标转换矩阵 \mathbf{R}_{cW} 和 \mathbf{T}_{cW} 有关, 即

$$\mathbf{P} = \begin{bmatrix} p_{11} & p_{12} & p_{13} & p_{14} \\ p_{21} & p_{22} & p_{23} & p_{24} \\ p_{31} & p_{32} & p_{33} & p_{34} \end{bmatrix} = [\mathbf{A} \quad \mathbf{0}] \begin{bmatrix} \mathbf{R}_{cW} & \mathbf{T}_{cW} \\ \mathbf{0}^T & 1 \end{bmatrix}, \quad (4)$$

式中: $\mathbf{0}$ 为 3×1 维度的列向量。

由于相机参数标定误差、图像立体匹配误差等因素的综合影响, 实际上不同视角的反投影光线难以严格地相交于一点, 如图 2(b) 所示。给定 $n \geq 2$ 个视角的目标图像序列, 根据式 (3) 产生 $2n$ 组约束, 通过最小二乘法求解该超定线性方程组以确定点 M 的重建位置, 再通过光束平差 (或称捆集调整) 对部分参数进行优化^[14], 提升三维信息解算精度。

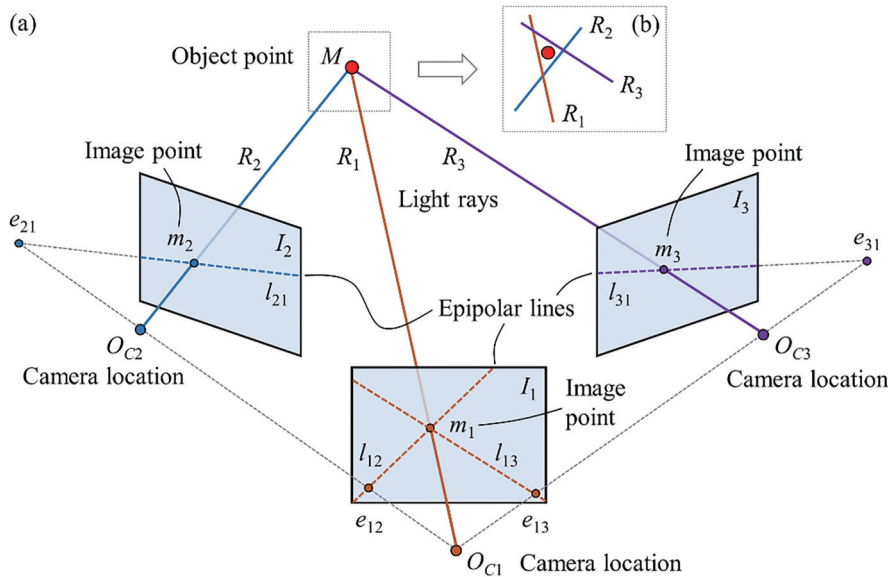


图 2 多视图几何模型。(a) 多视角成像及立体匹配关系; (b) 投影光线空间交会定位原理

Fig. 2 Multiview geometry model. (a) Multiview imaging with stereo correspondences; (b) space resection among backward projection rays

3 单相机三维视觉成像技术

为了获取三维成像所需要的多视角图像序列, 许多研究从系统组成层面提出了基于相机运动感知或引入附加光学元件的图像采集策略^[17-18], 且结合相机成

像模型与多视几何模型建立了三维信息提取和立体重建方法。随着人工智能理论的发展, 也有研究探索如何利用深度学习算法从单幅图像实现深度估计及三维重建^[19, 28]。本小节重点介绍基于相机运动感知和基于附加光学元件的三维视觉成像技术, 同时围绕其实现

方法的优越性和局限性展开讨论。

3.1 基于相机运动的三维成像技术

一般而言,相机运动可以通过搭载机械位移装置或车辆、舰船、机器人、飞行器、卫星等运动平台来实现,并通过相机本体的位置及姿态变化实现空间分布感知,即允许相机从许多不同的成像视角捕获目标信息。根据相机运动规律是否明确可控,又可分为相机运动未知的运动恢复结构(SfM)技术^[29]和相机运动已知的三维集成成像技术^[17]。

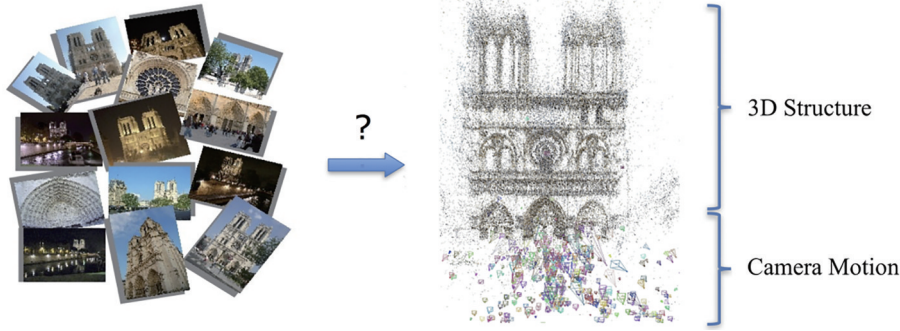


图3 运动恢复结构问题^[29]

Fig. 3 Structure from motion problem^[29]

特征提取与匹配是从多视角图像序列中建立同名点对关系并估计相机运动姿态的前提条件,通常包括关键点检测、局部特征描述、局部特征匹配。在诸多局部图像特征中,尺度不变特征变换(SIFT)是最具代表性和启发性的工作之一^[30],其在高斯差分金字塔的基础上检测图像关键点并构造特征描述符,广泛应用于基于SfM原理的多视角三维重建中^[31-33]。还有许多通过人工设计或深度学习的图像特征描述,如加速稳健特征(SURF)、局部强度顺序模式(LIOP)、深度学习不变特征变换(LIFT)等,均在SfM三维重建方面有较好的性能^[34-35]。通过计算不同视角图像内局部特征向量的距离信息,寻找一系列满足最佳匹配准则的对应关键点,即可建立多视角图像特征的相互匹配关系。

相机运动估计是从每对图像的特征匹配关系估计相机空间位姿变化的环节。根据图2给出的多视几何模型,任意两个视图下物点 M 、像点 m 及相机位置 O_c 之间满足共面关系。结合同名像点观测位置 (m_i, m_j) 和相机的位置姿态 $(\mathbf{R}_i, \mathbf{T}_i)$ 及 $(\mathbf{R}_j, \mathbf{T}_j)$ 的关系^[23]可描述为

$$\mathbf{m}_i^T \left\{ \left[\mathbf{R}_i^T (\mathbf{T}_j - \mathbf{T}_i) \right]_{\times} \mathbf{R}_i^T \mathbf{R}_j \right\} \mathbf{m}_j = \mathbf{m}_i^T \mathbf{E}_{ij} \mathbf{m}_j = 0, \quad (5)$$

其中: \mathbf{R} 和 \mathbf{T} 分别表示相机相对于其参考位姿的旋转矩阵和平移向量; $[\cdot]_{\times}$ 表示与向量对应的斜对称矩阵; \mathbf{E} 为包含相机旋转变换和平移变换的本征矩阵。

通用的相机运动估计方法采用相机位置及姿态解耦估计策略,即先通过逐对图像的旋转参量估计获取相机的姿态角度,再结合平移参量估计求解相机的位

3.1.1 运动恢复结构

运动恢复结构技术可从静态目标场景的有序或无序图像集合估计相机运动轨迹并恢复三维场景结构,如图3所示。求解运动恢复结构问题主要包含三个阶段:图像特征提取与匹配、根据特征匹配关系估计相机运动、结合相机运动与特征匹配重建三维结构^[23, 29]。由于重建精度高、信息维度丰富、适应复杂环境条件、满足不同尺度要求等优势,运动恢复结构技术广泛应用在摄影测量、空间遥感、自动导航、虚拟现实等诸多领域。

置坐标。在旋转参量估计方面,大部分研究采用基于因子分解的全局方法或基于局部梯度的迭代方法,或采用基于离群值推断的方法提升旋转估计精度^[36-38];在平移参量估计方面,许多研究针对其缺乏尺度信息的特点提出了融合不同约束条件的代价函数,如误差平方和最小化、基于凸规划的误差最小化等^[32, 39]。此外,也有研究采用相机位置及姿态联合估计策略,如通过李群代数迭代平均方法高效求解相机位姿参数,或利用组同步技术同时获取旋转、尺度和平移参数^[40-41]。

三维结构重建是在特征提取匹配和相机运动估计的基础上实现三维信息获取及场景重构的环节。根据不同的计算策略,三维结构重建方法大致划分为增量重建方法、全局重建方法、运动与结构联合估计方法等^[29]。增量重建方法采用顺序处理策略,从多视角图像序列中提取关键子集以实现初步的三维重建,再结合相机位姿估计参数融入其他的图像信息,以便利用光束平差方法完成最终的三维重建^[42]。关键子集提取可以根据图像之间重合区域大小、强度相关程度、遮挡推理分析等实现,克服逐一顺序加入全部图像的局限性,提升三维重建的精度和效率^[43]。针对大规模无序图像的SfM全局三维重建问题,构建多视图图像匹配、关键子集提取、相机运动估计和三维结构恢复等多阶段并行处理框架,也成为重要的发展方向^[44-45]。还有三维结构重建方法在相机姿态估计的基础上,将相机位置和三维结构的联合估计转化为偶图匹配问题(相机位置和场景点为节点、相机位置和对应该场景点之间的方向为边),为机器人即时定位与建模应用提供了新的途径^[46]。

3.1.2 三维集成成像

三维集成成像技术源自 Lippmann^[47]关于集成照相技术的设想,即在照相胶片前方加入微透镜阵列,用以从不同视角采集三维场景的多幅元素图像,如图 4 所示。随着光学聚焦透镜、光电探测器件的引入以及

数字图像处理算法的融合^[48-49],三维集成成像技术在光场捕获、重建及显示方面展现出独特优势,由此发展为阵列孔径、合成孔径等实现形式及全光相机、光场相机等典型产品,成功应用在医学检查、显微成像、缺陷检测等领域^[17, 50]。

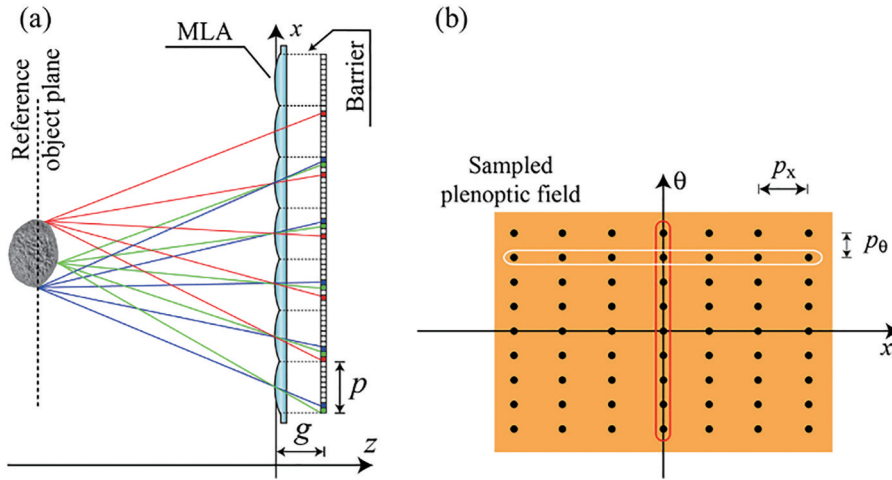


图 4 Lippmann 提出的集成照相系统^[17]。(a)基本成像原理;(b)光场采样模式

Fig. 4 Integral photography proposed by Lippmann^[17]. (a) Basic imaging principle; (b) light field sampling mode

从阵列孔径角度构建三维集成成像系统是最为直接的实现途径^[48],通过光学镜头汇聚来自三维场景的不同方向光线,使其经过微透镜阵列的不同透镜元件并在对应的像素区域形成元素图像。每幅元素图像仅能占据相机传感区域的部分像素,且元素图像的数量与微透镜元件的数量相同。利用微透镜阵列偏移或多台相机阵列布置构建三维成像系统能有效解决分辨率受限问题^[51-52],但其光场采样能力仍取决于微透镜元件或相机传感器的数量。

为此,许多研究利用单台相机来构建合成孔径三维集成成像系统^[50],将相机搭载在运动平台上采集任意数量的元素图像,允许调节元素图像的间距和视差范围,从而形成基于轴向、离轴、侧向及周向等分布感知策略的集成成像系统及三维计算重建方法^[53-60]。

在轴向分布感知三维成像系统中,沿着光轴方向平移运动的相机可在多个距离上采集不同视角的元素图像,再通过反向投影和尺度缩放即可在任意指定平面实现感兴趣目标重建^[53],如图 5 所示。从算法层面出发,还可在相机运动未知或目标遮挡条件下实现轴向分布感知三维集成成像^[54-55]。在离轴分布感知三维成像系统中,沿着非光轴方向平移运动的相机同时从侧向和纵向视角获取三维场景的元素图像,再结合元图像偏移和尺度缩放运算实现目标场景重建及遮挡区域可视化^[56],如图 6 所示。通过引入广角镜头及其畸变校正算法,离轴分布感知成像系统可在 170°视场范围实现三维集成成像^[57]。利用基于轮廓测量的深度信息提取技术和基于光线追迹的元素图像合成方法,还能提升计算重建和光学显示的质量^[58]。

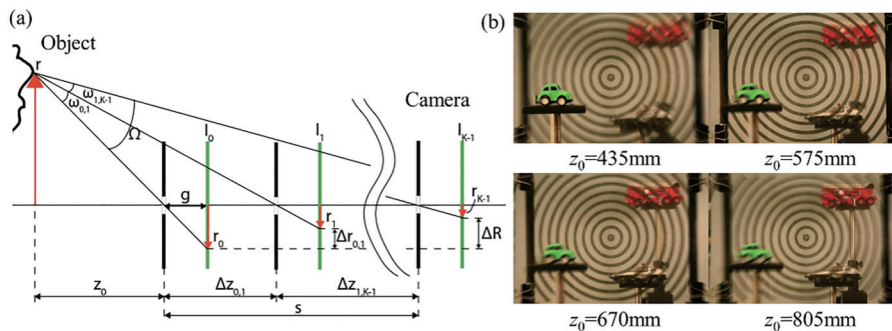


图 5 轴向分布感知三维集成成像方法^[53]。(a)元素图像采集策略;(b)在不同距离平面上重建目标

Fig. 5 3D integral imaging based on axially distributed sensing^[53]. (a) Pickup strategy for elemental images; (b) reconstructed images at different depths

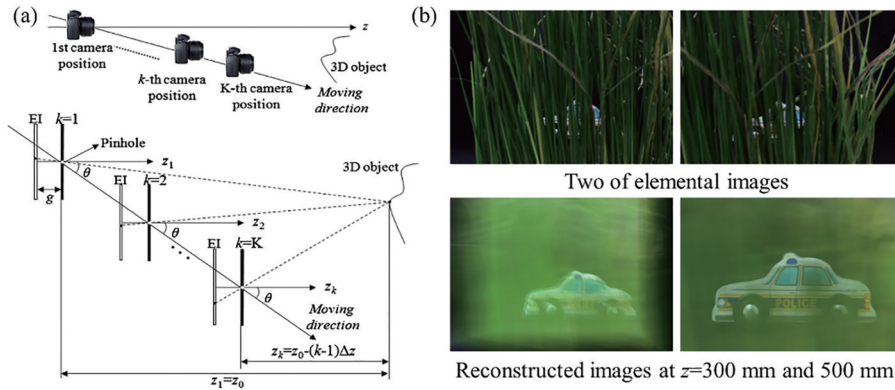


图 6 离轴分布感知三维集成成像方法^[56]。(a)元素图像采集策略;(b)包含目标遮挡的元素图像和三维重建的目标切片图像
Fig. 6 3D integral imaging based on off-axially distributed sensing^[56]. (a) Pickup strategy for elemental images; (b) two elemental images with object occlusion and 3D reconstructed slice images

部分研究利用相机的二维运动来捕获更为丰富的光场信息^[59-60],以解决视场范围和空间分辨率相互制约的问题。通过控制相机在特定平面内进行二维平移运动,系统可从多个固定间距、网格分布的视点位置采集三维场景的元素图像,结合点扩散函数分析和亚像

素级光线感知技术,可在任意深度上精确重建三维目标的位置和强度信息^[59],如图 7 所示。此外,控制相机沿着以目标为中心的圆形轨迹运动能够实现周向分布感知,结合几何光学模型和三角测量原理完成相机位置的精确估计及目标场景的计算重建^[60]。

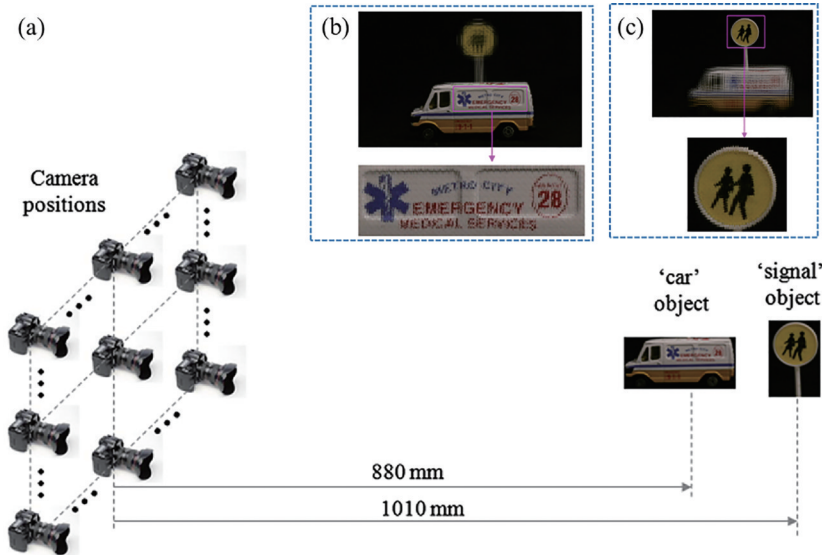


图 7 利用相机平面运动的三维集成成像方法^[59]。(a)元素图像采集策略;(b)“汽车”目标的重建图像;(c)“信号灯”目标的重建图像
Fig. 7 3D integral imaging based on planar camera motion^[59]. (a) Pickup strategy for elemental images; (b) reconstructed image for “car” object; (c) reconstructed image for “signal” object

总体而言,三维集成成像技术可以通过规则或不规则的光场采样模式,获取广阔的视场范围、丰富的视觉信息和良好的成像质量,但是该技术依赖运动平台改变相机的拍摄视角,以获取数量较多的元素图像,这必然要求复杂的机械结构、充足的运动空间及较长的图像采集时间,因而仅能适应静态或低动态场景的三维成像需求。

3.2 基于附加元件的三维成像技术

结合附加光学元件的三维成像技术通常在相机前方引入光学元件,利用光学元件对投影光线的调制作用产生不同的成像视角,使相机能在固定状态下记录

三维场景的多视角图像。这提高了系统结构集成性和图像采集效率,也克服了双/多台相机的标定和同步问题。根据视角产生机制,该技术大致可分为镜面反射型、棱镜折射型、光栅衍射型三类^[18]。

3.2.1 镜面反射型三维成像

镜面反射型三维成像技术具有原理简单、形式灵活、实现方便、应用广泛等特点,可以根据具体的应用场合及性能要求采用最优的配置布局方案^[61]。根据镜面反射的结构特点,该技术又可细分为平面反射式和曲面反射式两类。

采用平面反射镜组的三维成像技术包含单镜面、

双镜面、三镜面或四镜面等形式,如图 8 所示。相机在单镜面辅助下同步采集目标的实像和反射所成的虚像,两者在单次曝光图像内具有几何对称性,故通过立体视觉重建算法即可恢复目标的三维信息^[62-63]。相机与双镜面组合方案能克服离焦模糊和视场受限问题,利用相机单次采集目标在两镜面内的虚像,可等效为两台虚拟相机从不同视角捕获目标^[64-65]。相机与三镜面组合方案可以利用反射镜面的形位约束或引入额外的分光元件,使得相机单次采集的双视角图像自动对准,减少了立体校正和三维重建的运算时间^[66-67]。相

机与四镜面组合方案利用两侧对称分布的反射光路,产生双成像视角并进行立体匹配和三维测量^[68-69],相比其他方案具有更强的灵活性和适应性,可应用于火焰表面形貌、气液两相流流型等动态成像与立体重建领域^[70-71]。该系统与数字图像相关技术结合,适用于高速位移变形测量、高温应力应变测量、全场振动测量等典型场景,如图 9 所示^[72-73]。利用对称布置的四反射镜面和超快位姿控制的二维摆镜,单相机成像系统可在实时跟踪目标运动的基础上准确恢复目标的三维形貌及姿态信息,如图 10 所示^[74]。

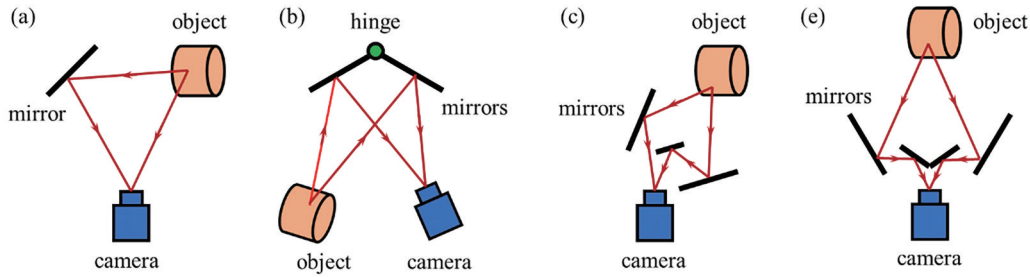


图 8 采用平面反射镜组的三维成像系统。(a)单镜面^[62]; (b)双镜面^[64]; (c)三镜面^[66]; (d)四镜面^[68]
 Fig. 8 3D imaging system structure with a set of planar mirrors. (a) One mirror^[62]; (b) two mirrors^[64]; (c) three mirrors^[66]; (d) four mirrors^[68]

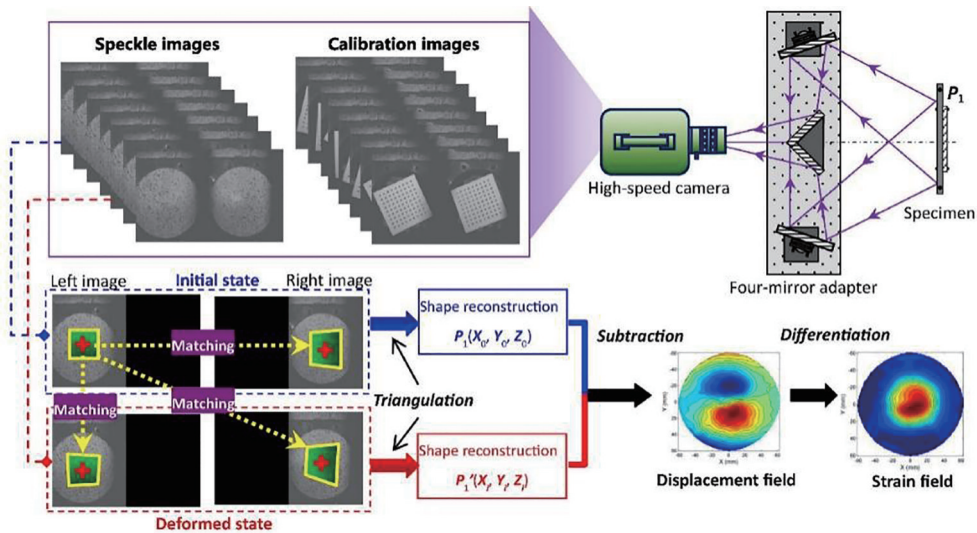


图 9 结合四反射镜式三维成像系统与数字图像相关技术的三维形貌及变形测量方法^[72]
 Fig. 9 3D profile and deformation measurement method combining four-mirror-based 3D imaging system with digital image correlation technique^[72]

采用曲面反射镜组的三维成像技术通过镜面结构设计和布局优化来扩大成像视场范围,主要表现为椭圆面、双曲面、抛物面等形式^[75]。通过小/大波瓣镜面的嵌套组合,相机可在全方位范围内同时采集两个镜面对目标反射所成的虚像,再利用内环和外环视角的图像视差恢复目标深度及三维信息^[76]。采用共轴布置的相机和双曲面镜能从硬件结构上保证不同视角的图像对应点满足径向共线关系,实现准确高效的三维场景重建^[77],如[图 11(a)~(c)]所示。相机与鱼眼透镜

和凸面镜组合方案则能有效扩大三维成像的垂直视场范围^[78]。在相机与多球面镜阵列构成的全向立体视觉系统中,四面副镜对称布置在中心主镜的周围,相机可从上方同时采集五个镜面内的反射像,再通过球面极线校正、视差计算及多视角融合实现准确的三维目标重建^[79],如[图 11(d)~(e)]所示。这类系统能以较高速率获取全向视场范围内的信息,尤其适合机器人导航、动态监测、远程再现、虚拟现实等应用领域。

镜面反射型三维成像技术利用投影光线反射特性

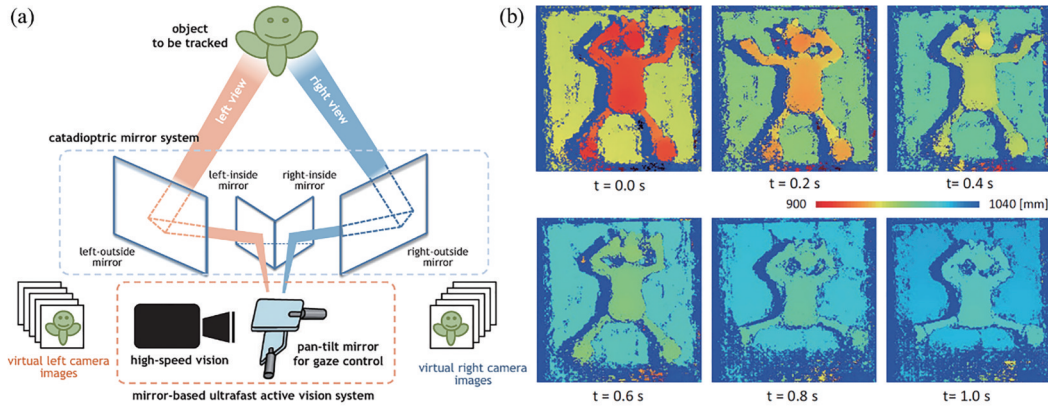


图 10 结合四镜面折反系统和二维转镜的动态三维成像方法^[74]。(a)光学布置形式;(b)不同时刻的动态目标三维跟踪成像结果
Fig. 10 Dynamic 3D imaging method combining four-mirror catadioptric system with a pan-tilt mirror^[74]. (a) Optical arrangement;
(b) 3D tracking and imaging for a dynamic object

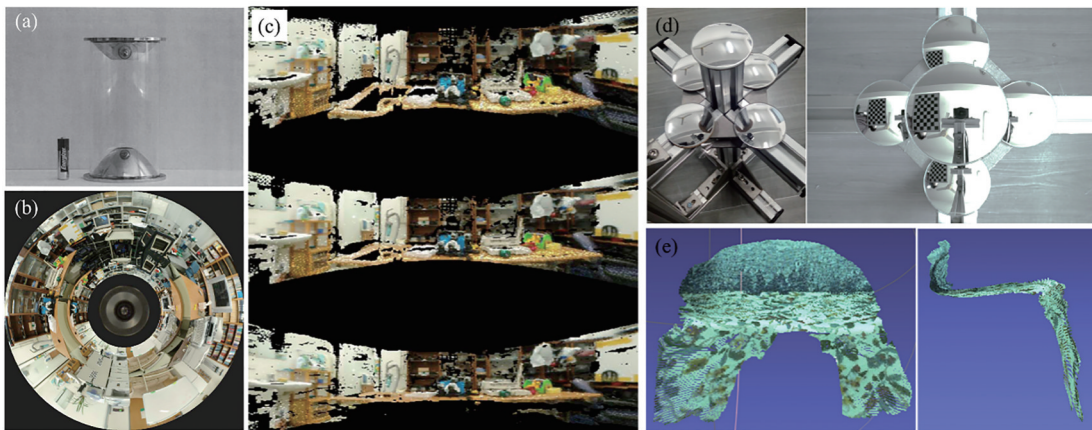


图 11 采用曲面反射镜组的三维成像方法。(a)~(c)双曲面镜相向布置的三维成像系统结构、实际采集图像及三维重建图像^[77];
(d)~(e)多球面镜阵列布置的三维成像系统结构及三维重建图像^[79]
Fig. 11 3D imaging methods using curved mirrors. (a)–(c) System with two oppositely configured hyperboloidal mirrors, panoramic
image captured by system, and 3D reconstruction results^[77]; (d)–(e) system with an array of spherical mirrors, and 3D
reconstructed images^[79]

产生至少两个成像视角,从几何光学角度来看与传统的双目或多目立体视觉等效,但其不足之处在于:反射元件往往对机械误差和环境扰动敏感,给系统总体结构设计和参数标定等环节提出了较为严格的要求;相机在单次曝光时间内捕获多个视角的信息,必然会降低各个视角下的图像分辨率,从而影响立体匹配和三维重建的精度。

3.2.2 棱镜折射型三维成像

棱镜折射型三维成像技术最初采用二分棱镜作为附加光学元件^[80],沿着相同方向的入射光线可沿两条不同光路透过二分棱镜并被相机接收,由此产生两侧对称的成像视角以实现视差估计和三维重建。在二分棱镜成像模型方面,最简便的策略是通过刚体变换将任意物点转化为一对虚拟像点,称为虚拟点模型^[80];也可利用几何光学原理构建两台对称的虚拟相机,以模拟相机与二分棱镜组合的成像功能,称为虚拟相机模型^[81]。后续研究结合相机成像模型和光线追迹方法,

建立了更加准确地修正虚拟点模型^[82];或利用射影几何原理,构建仿射变换矩阵以描述二分棱镜对光线的折射作用,得到透视投影模型^[83]。修正虚拟点模型和透视投影模型摒弃了虚拟点模型和虚拟相机模型的近似假设,有效改善了三维形貌测量及目标重建的精度,如图 12 所示。同时,许多学者针对二分棱镜成像系统的畸变校正、极线几何、图像匹配等问题开展研究^[84-86],形成了比较系统的三维重建技术流程,支撑了其在高温变形测试、临床内窥成像、工业视觉测量等复杂环境条件下的应用。

为了满足三维成像系统的轻量化、便携性和集成性等要求,采用微棱镜阵列替代二分棱镜成为极具潜力的技术途径^[87-90]。微棱镜阵列由多组对称布置的微棱镜元件构成,入射到该阵列的光线会被朝向相反的微棱镜元件偏转至不同方向,从而允许相机从两种成像视角捕获目标场景,为构建小型化的机载单相机立体成像系统提供了可能^[87-88]。在微棱镜阵列加工、装

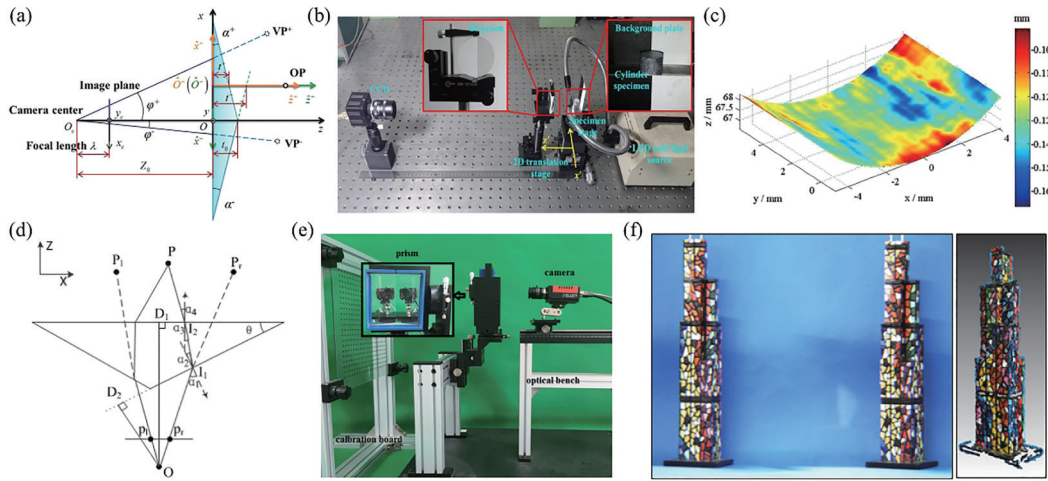


图 12 采用二分棱镜的三维视觉成像方法。(a)~(c)基于修正虚拟点模型的三维测量原理、系统及实测误差^[82]；(b)~(f)基于透视投影模型的三维重建原理、系统及目标形貌^[83]
 Fig. 12 3D stereo imaging technique using a biprism. (a)~(c) 3D measurement principle based on modified virtual point model, system structure and measurement error map^[82]；(d)~(f) 3D reconstruction principle based on perspective projection model, system structure and reconstructed object^[83]

配以及与相机模组集成的基础上,可以建立结构紧凑的立体内窥成像系统,实验证明了该系统能在不同距离下重建目标的视差和三维信息^[89],如图 13 所示。此

外,从光学设计角度优化微透镜阵列的结构,还可有效克服其成像色差和图像畸变问题^[90]。

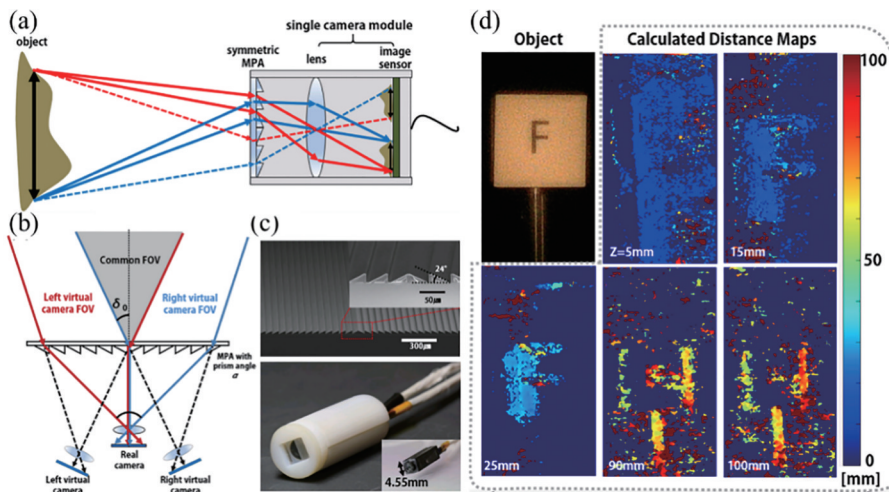


图 13 采用微棱镜阵列的立体内窥成像方法^[89]。(a)系统组成；(b)三维成像模型；(c)微透镜阵列及系统实物；(d)不同目标距离下重建的距离图
 Fig. 13 Stereo endoscopic imaging method using microprism arrays^[89]. (a) System setup; (b) 3D imaging model; (c) prototype of microprism array and system; (d) reconstructed depth maps for an object at different distances

不同于固定结构形式的二分棱镜和微棱镜阵列,利用光学透明平板的旋转或偏摆运动可以提供相机成像视角变化的自由度^[91-94]。由于入射光线经过透明平板两次折射发生偏移,控制平板旋转或偏摆即可改变光线偏移量,使相机可从多种视角下获取目标场景的图像序列,实现深度估计和三维重建^[91-92]；引入微机电系统驱动平板的大角度偏摆运动,可在满足系统结构紧凑性的条件下达到较好的视差估计效果^[93],如图 14 所示。将此类系统与其他相机结合,还可利用双目立体视觉原理实现高质量的深度估计与信息融合^[94]。

由于透明平板三维成像系统在基线距离和视差范围等方面存在固有的局限性,利用楔形棱镜旋转运动来构建单相机立体成像系统或将成为重要发展方向^[95-97]。通过旋转棱镜实现动态、精确、灵活的成像视轴指向调整,固定相机能在无数种可能的成像视角下拍摄目标图像,近似等效于绕着光轴与棱镜同步旋转的动态虚拟相机。结合多视角图像匹配、逆向光线投影与三角交会测量等方法,该系统可在兼顾视场范围和成像分辨率的同时,完成较高质量的三维形貌及尺度重建^[95],如图 15 所示。相机与旋转双棱镜组合还可

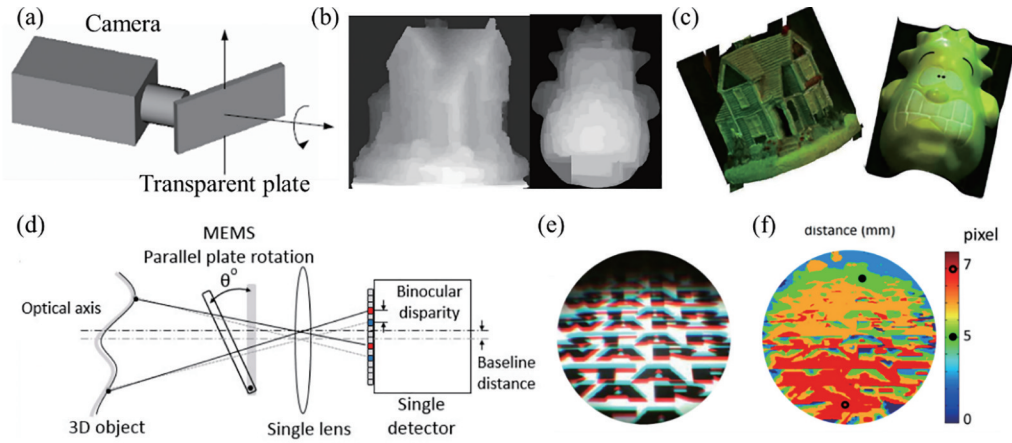


图 14 采用透明平板的三维成像方法。(a)~(c)系统基本组成、目标深度图和三维重建图^[92]；(d)~(f)微机电系统驱动平板的成像原理、立体校正图和视差估计图^[93]

Fig. 14 3D imaging with an optically transparent plate. (a)-(c) System setup, depth estimation maps, and 3D reconstructed images^[92]；(d)-(f) system setup with a MEMS-driven plate, rectified image, and depth map^[93]

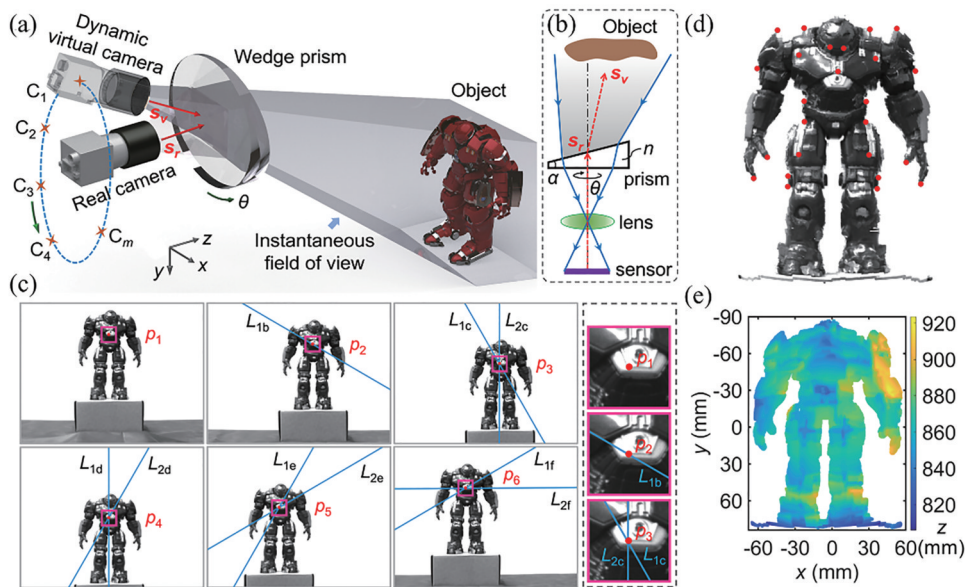


图 15 采用旋转楔形棱镜的三维成像方法^[95]。(a)系统组成；(b)成像模型；(c)多视角图像匹配；(d)三维形貌重建；(e)三维尺度重建
Fig. 15 3D imaging using a rotational wedge prism^[95]. (a) System structure；(b) imaging model；(c) multiview stereo image matching；(d) 3D profile reconstruction；(e) 3D scale reconstruction

进一步扩大成像视场,且允许更为灵活的视角变化,为三维立体成像提供了更多的可能^[96-97]。

棱镜折射型三维成像技术利用投影光线透过附加元件的折射作用产生不同的成像视角,充分保证了成像系统集成优化及其应用在空间受限场景的可行性,但随之而来的畸变、色散、离焦等图像降级问题依赖光学设计或校正算法来解决。以二分棱镜为代表的静态元件,在克服图像采集同步问题、保证动态成像实时性等方面具有优势;而以旋转棱镜为代表的动态元件,则能有效弥补单相机三维成像在大范围、高分辨率等方面的不足之处。

3.2.3 光栅衍射型三维成像

光栅衍射型三维成像技术利用光栅结构的光线衍

射作用,使相机在单色照明下能从对称的侧向视角采集目标的立体图像,实现三维信息的获取^[98-99]。该三维成像系统可通过数字图像相关技术从衍射图像的匹配关系恢复目标的三维变形、位移及应力等信息,也可结合荧光显微技术达到亚毫米级的空间分辨率和亚像素级的测量精度^[100-102],如图 16 所示。

结合几何光学和波动光学分析衍射光栅成像特性可知,相机与衍射光栅组合能高效获取三维目标的元素图像阵列,且引入多个衍射光栅还可成倍数地提升成像系统的视角及元素图像数量^[103-104]。由于每幅元素图像均可当作是被对应的虚拟针孔采集得到的,通过反向投影方法将元素图像阵列投影到三维物方空间可实现视差区域分割和三维计算重建^[105]。针对

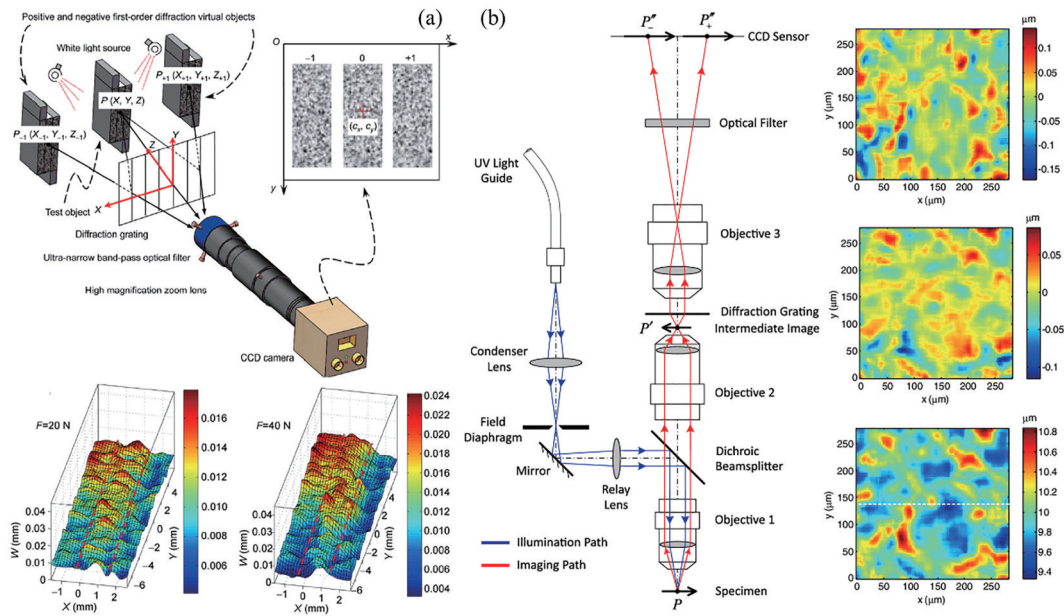


图 16 采用衍射光栅的三维信息获取方法。(a)基于数字图像相关的三维测量系统及重建位移场^[100]; (b)结合荧光显微技术的三维测量系统及重建位移场^[101]

Fig. 16 3D information acquisition based on diffraction grating. (a) 3D digital image correlation measurement system for 3D displacement reconstruction^[100]; (b) 3D diffraction-assisted fluorescent microscopy for 3D displacement reconstruction^[101]

单色照明下衍射成像易受噪声、伪影、模糊等影响的问题,研究人员提出了一种多波长激光照明的衍射光栅三维集成成像系统,该系统利用红、绿、蓝三色通道

的元素图像阵列进行计算重建和信息融合,能够显著地提升深度提取精度和三维成像质量^[106],如图 17 所示。

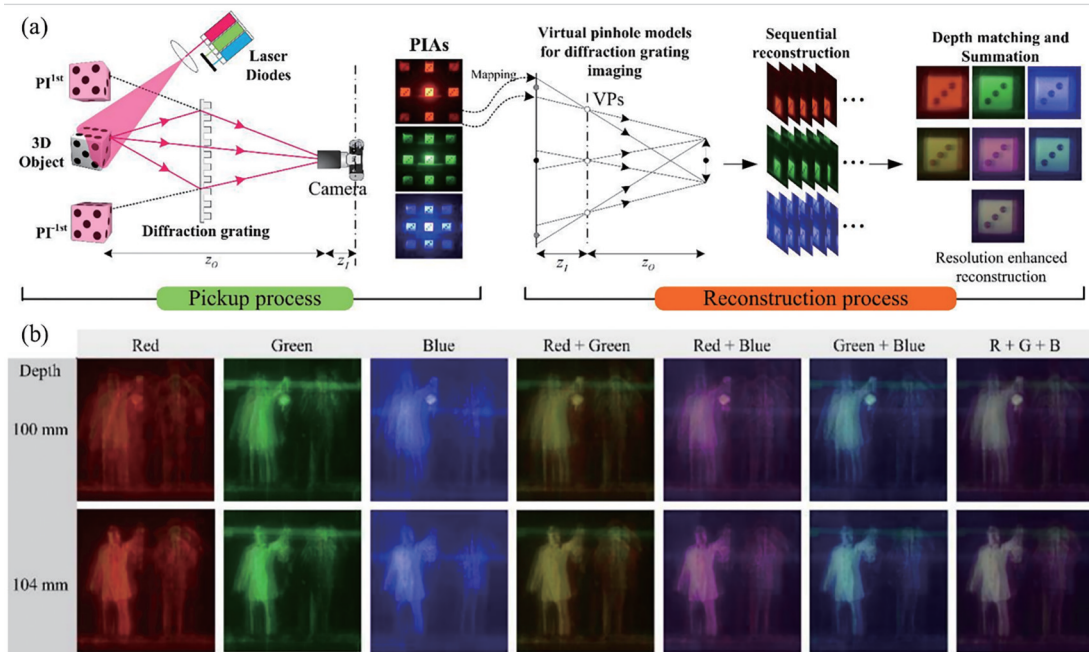


图 17 采用衍射光栅的三维集成成像方法^[106]。(a)多波长照明条件下基于衍射光栅的图像采集和三维重建原理; (b)根据不同波长下元素图像阵列重建的三维图像

Fig. 17 3D integral imaging using a diffraction grating^[106]. (a) Diffraction-grating-based image capture and computational reconstruction under multi-wavelength laser illumination; (b) 3D reconstructed images from parallax image arrays obtained with different wavelengths

光栅衍射型三维成像技术在系统结构集成、多视角图像生成和高分辨率采集等方面具有明显优势,受到实验力学和医学观测等领域的青睐。但成像系统的

光学效率受限于衍射光栅本身特性,在每次曝光时间内要求额外的光源装置提供单色或准单色照明,且成像系统的有效视场范围比较有限,主要适用于特定场

景下微小尺度目标的三维轮廓重建。

3.2.4 方法比较

为了充分阐明采用不同附加光学元件的三维成像技术的优越性和局限性,表 1 列出了各类典型方法的基本原理、附加元件类型、视角变化机制及性能特点。对于使用反射镜、二分棱镜、微棱镜阵列和光栅等静态光学元件的方法而言,其不同视角图像捕获过程均采取空分复用策略,即利用相机传感器的不同区域来记录对应视角的图像,但这要以牺牲视场范围和图像分

辨率为代价。引入透明平板、楔形棱镜等动态光学元件的方法则采取时分复用策略,利用相机传感器在不同时刻捕获多个视角的全分辨率图像信息,但这同时也在运动部件及控制模块、图像采集及处理时间等方面提出更为复杂的要求。值得注意的是,平面反射镜组和偏摆反射镜的组合、衍射光栅和多波长照明光源的组合能够兼顾空分复用策略和时分复用策略的优势,为发展功能集成化的三维视觉成像方法提供了重要方向。

表 1 各类附加光学元件三维成像方法比较
Table 1 Comparison of 3D imaging methods using various additional optical elements

Category	Optical element	View division	Strength	Shortcoming
Reflection	Planar mirrors ^[62-69]	Space	Simple setup, free from distortion, synchronous image acquisition	Reduced field of view and spatial resolution
	Planar mirrors and pan-tilt mirror ^[74]	Space & Time	Wide field of view, fast dynamic response, multiview acquisition	Complexity in hardware and control, sensitivity to random error sources
	Curved mirrors ^[75-78]	Space	Omnidirectional stereo	Complicated mirror design, limited spatial resolution
	Multi-mirror array ^[79]	Space	Omnidirectional stereo, multiview acquisition	Tradeoff between field of view and resolution
Refraction	Biprism ^[80-83]	Space	Compact structure, viewpoint symmetry, image synchronization	Biprism distortion, certain perspective, limited field of view
	Microprism array ^[87-89]	Space	Light weight, miniaturization	Increased cost on micro design and fabrication
	Transparent plate ^[91-93]	Time	High-resolution multiview acquisition	Requiring plate rotation, small stereo baseline, limited disparity range
	Wedge prism ^[95-97]	Time	Cost-effective setup, flexible perspective, extended field of view	Requiring prism rotation, increased time for multiview acquisition
Diffraction	Grating under monochromatic illumination ^[98-102]	Space	Stereoscopic image acquisition, high-accuracy reconstruction	Requiring illumination, limited to micro or small objects
	Grating under multi-wavelength illumination ^[106]	Space & Time	Multi-spectrum image acquisition, enhanced 3D reconstruction quality	Requiring illumination, more time cost for image collection

4 单相机视觉系统标定技术

单相机三维视觉成像系统标定是从二维图像获取实现三维重建所需各项参数的过程,其标定精度和效率直接决定着三维立体成像的质量。对基于运动恢复结构的三维成像技术而言,系统标定任务是确定相机的内部参数及其在各个拍摄位置的位姿参数,其中相机内部参数可通过相机标定技术预先确定,也可在相机运动估计阶段随着位姿参数共同产生^[29]。对基于相机运动的三维集成成像技术而言,相机的内部参数通常预先标定,而图像采集过程中相机的位置参数则由运动平台反馈^[17]。采用附加光学元件的三维成像系统面临更为复杂的参数标定任务,包括相机内部参数、元件内部参数及相机和元件的未对准参数。

由于相机内部参数标定技术发展较为成熟,在传统

标定方法、自标定方法、基于主动视觉的标定方法及无模型标定方法等领域均有丰富的文献可供借鉴^[107-108],本小节重点从附加元件未对准参数方面阐述单相机三维视觉成像系统标定问题及其主要解决方法。

4.1 镜面反射型成像系统标定方法

采用平面反射镜组的三维成像系统的标定过程通常可以转换为两台虚拟相机的内外参数估计问题,其外部参数反映着相机与反射镜面的实际位姿关系,如图 18 所示。两台虚拟相机的内外参数可以通过各自标定方法实现,即分别利用标靶图像序列的左右部分标定两台虚拟相机的内部参数,再参照双目视觉标定方法计算两者的外部参数;由于仅存在镜面反射作用,也可认为两台虚拟相机的内部参数和镜头畸变系数相同,建立包含简化参数的虚拟双目视觉数学模型和直接标定方法,避免参数标定过程受到环境噪声影响或

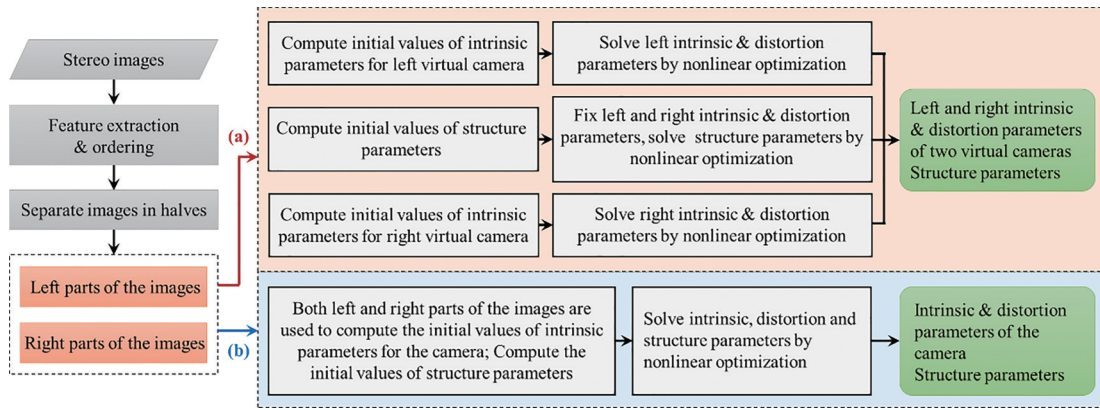


图 18 采用平面反射镜的三维成像系统标定方法^[109]。(a)两台虚拟相机各自标定方法流程;(b)系统参数直接标定方法流程
Fig. 18 Calibration of 3D imaging system using planar mirrors^[109]. (a) Respective calibration for two virtual cameras; (b) direct calibration for system parameters.

陷入局部最优^[109]。还有研究采用三维空间光路分析方法,建立系统结构参数与三维成像参数的映射关系,并结合成像景深和畸变分区模型实现从内部参数、畸变系数到外部参数的逐步标定^[110]。

针对相机和曲面反射镜构成的三维成像系统标定问题,通常需要结合相机投影模型和镜面结构模型将

相机成像视轴与反射镜光轴的未对准关系融入三维成像数学模型。为了准确地获取成像模型包含的未知参数,比较典型的方法是在曲面镜座上布设一定数量的控制点^[111],如图 19 所示。利用多个控制点提供的几何约束信息,估计相机坐标系和曲面镜坐标系的转换矩阵,从而求解相机与曲面镜之间的未对准参数。

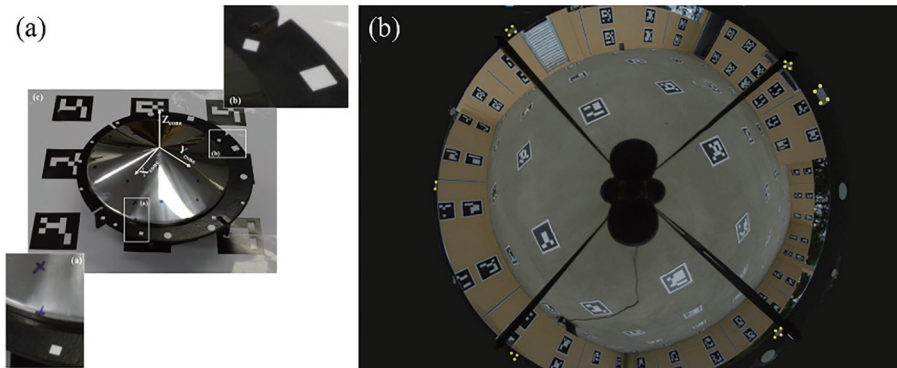


图 19 采用曲面反射镜的三维成像系统标定方法^[111]。(a)布有多个控制点的曲面反射镜结构;(b)系统采集的包含控制点的标定图像

Fig. 19 Calibration of 3D imaging system using a conic mirror^[111]. (a) Conic mirror structure with multiple control points on mirror base; (b) a calibration image with control points captured by system

4.2 棱镜折射型成像系统标定方法

在采用二分棱镜的三维成像系统标定方面,通常利用光学辅助手段调节二分棱镜,尽可能使其达到与相机轴向对准的预期位姿。部分研究考虑到相机与棱镜未对准的影响,从成像模型修正或畸变校正等角度达到误差补偿和精度提升的目标,具体分为无模型校正方法和参数化校正方法。无模型校正方法的实现思路如下:相机在前方有棱镜和无棱镜的情况下,分别获取三维空间内大量标定点的位置信息,结合优化方法构建二分棱镜导致的三维测量误差函数,用以校正成像系统在任意位置的重建误差^[112],如图 20 所示。参数化校正方法则在三维成像数学模型中考虑相机与二分棱镜的未对准关系,以相机与参照物之间的外部参数标定作为基准,通过极大似然估计和非线性优化方法

来获取未对准参数的最优解^[113-114]。此外,通过光学系统设计阶段和三维重建阶段的联合优化,开发兼顾结构与性能要求的成像系统,也可有效克服图像畸变和未对准误差对三维重建精度的影响^[115]。

为了提升旋转棱镜变视轴三维成像系统的目标场景重建精度,近期作者团队结合变视轴成像的几何光学分析和相机-棱镜未对准关系的参数化表征,建立了融合相机内部参数、棱镜内部参数、棱镜运动参数及未对准参数的严格数学模型^[116]。并在此基础上,提出了利用基准传递原理的模型参数标定方法,即通过辅助相机和成像系统同步捕获参照物在不同位置的图像序列,结合辅助相机基准信息和成像模型预测信息之间的累积偏差构建目标函数,进而利用非线性优化方法实现所有未对准参数的联合标定,如图 21 所示。

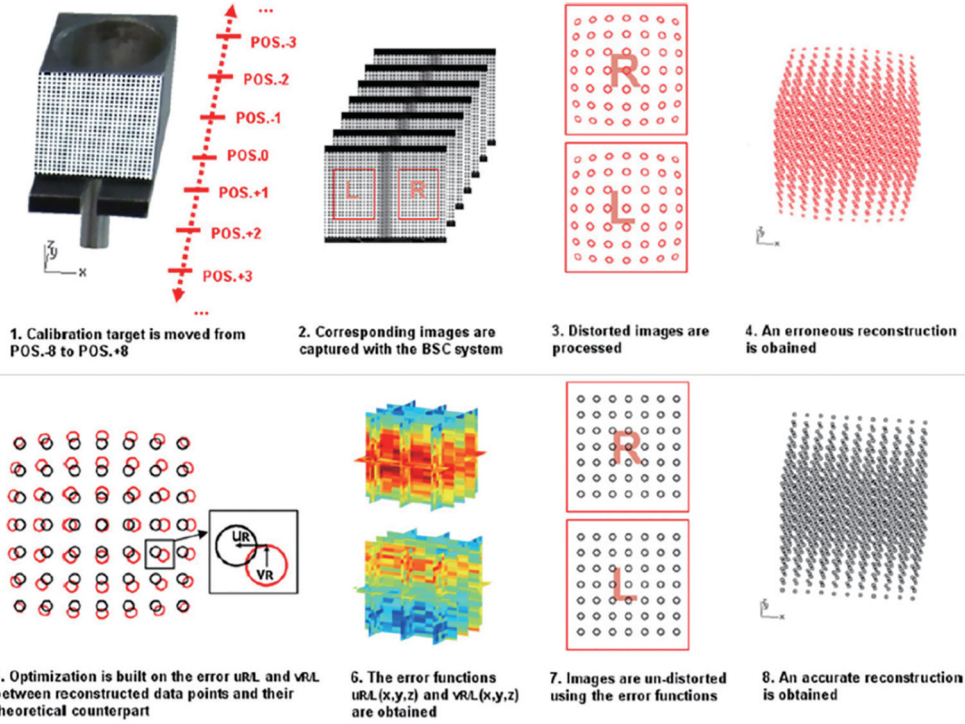


图 20 面向二分棱镜三维成像系统的无模型畸变校正方法^[112]

Fig. 20 Model-free distortion correction method for biprism-based 3D imaging system^[112]

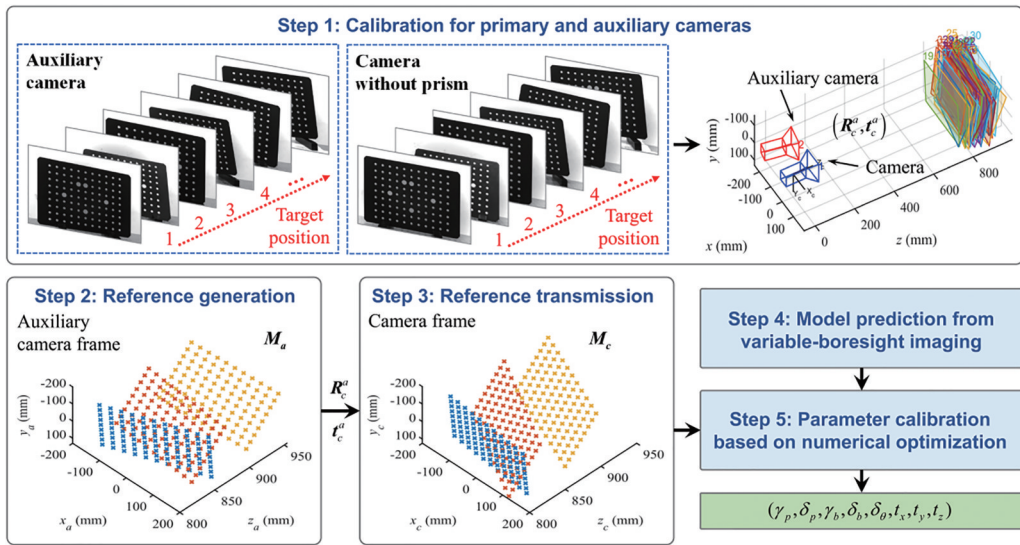


图 21 旋转棱镜变视轴三维成像系统标定方法^[116]

Fig. 21 Calibration method for rotational-prism-based variable-boresight 3D imaging system^[116]

综合来看,通过成像光路分析和误差溯源及建模等手段来描述从图像采集到三维重建的完整流程,可为单相机三维视觉系统标定提供极大的便利,既能降低标定过程的实施难度和时间成本,又能保证标定结果的准确性和稳定性。在误差来源较多且难以明确表征的应用场合,无模型标定方法具有明显的优势,可以克服某些未知或随机因素对三维重建性能的影响。当然,这两类方法的互补与融合也会成为解决系统标定问题的重要途径。

5 结论与展望

机器视觉技术的蓬勃发展与其应用需求的持续增长密切相关,不同应用领域的多元化、集成化、规模化等需求是机器视觉发展至今的重要驱动力。单相机三维视觉成像技术通过简单灵活的系统组成即可实现目标重建和场景感知,在智能制造感知、生物医学观测、机器人自主导航等诸多领域均有广阔的应用前景。该技术面临的主要挑战在于视场范围、空间分辨率、动态

响应性、环境适应性等指标相互制约,难以兼顾系统、算法、性能、成本等多层面的要求。因此,发展结构灵巧、功能集成、性能卓越的三维成像方法已经成为机器视觉研究领域的必然趋势。综合单相机三维视觉成像技术的发展历程和研究现状,在未来一段时间内还需要解决以下几个关键问题,这可能也是今后该领域研究工作的重点方向。

1) 大视场高分辨率三维成像。视场范围和空间分辨率的相互制约关系是影响许多单相机三维成像系统性能的共性问题,目前主要通过相机运动或引入动态光学元件来解决,但是相机运动要求复杂的结构载体和充足的作业空间,而动态光学元件易带来离焦、畸变、模糊、色散等图像降级因素。为了利用紧凑且集成的系统实现大视场高分辨率三维成像,需要建立融合动态光学元件成像特性的三维计算重建框架,围绕光场信息传输模型的严格表征、多视角图像的校正与匹配、多源误差分析及参数标定等方面,创新或优化单相机三维视觉重建流程的各个环节,提升系统在大视场范围内三维成像的准确性和可靠性。

2) 高动态高实时性三维成像。针对时变性目标或场景的三维重建及感知问题,采用静态光学元件的单相机三维成像方法具有同步获取双视角图像的独特优势,已成功应用于变形、应力、振动等动态参数测量,但其依赖数字图像相关技术来保证图像匹配精度和效率,而且如何借助单相机系统在更广阔的尺度内完成动态目标场景的三维跟踪成像仍是巨大的挑战。为此,可以探索静态附加光学元件与动态光学跟踪机构的嵌套组合设计方法,结合前者的同步图像获取作用和后者的快速视轴调整作用,实现三维重建与动态跟踪的功能集成。当然,从控制策略和处理算法层面来保证图像采集、校正、配准及目标识别、跟踪、重建的效率,也是提升单相机三维视觉成像实时性与跟踪响应性的重要途径。

3) 面向复杂应用场景的三维成像。随着机器视觉实际应用场景趋于多样化和复杂化,从目标场景到光学系统再到相机的图像生成过程可能难以通过物理模型准确描述,这将严重限制各类三维成像系统的适应性及其计算重建算法的可靠性。利用样本数据驱动的深度学习方法降低计算成像对物理模型和重建算法的依赖性^[117],或许能为面向复杂应用场景的单相机三维视觉成像技术提供可行的发展方向。一方面,可以利用深度学习方法在相关领域的研究及应用基础,在现有的单相机三维视觉成像框架下解决相机运动估计、图像质量增强、目标识别分割、误差溯源补偿等问题;另一方面,可以融合物理模型驱动和样本数据驱动两大范式的优势,从减少样本数据、加强泛化能力、提升可解释性及迁移性等角度,构建面向复杂环境条件下单相机三维视觉成像的深度学习方法及其实现方法。

参 考 文 献

- [1] Pérez L, Rodríguez Í, Rodríguez N, et al. Robot guidance using machine vision techniques in industrial environments: a comparative review[J]. *Sensors*, 2016, 16(3): 335.
- [2] 尹仕斌,任永杰,刘涛,等. 机器视觉技术在现代汽车制造中的应用综述[J]. *光学学报*, 2018, 38(8): 0815001. Yin S B, Ren Y J, Liu T, et al. Review on application of machine vision in modern automobile manufacturing[J]. *Acta Optica Sinica*, 2018, 38(8): 0815001.
- [3] 卢荣胜,史艳琼,胡海兵. 机器人视觉三维成像技术综述[J]. *激光与光电子学进展*, 2020, 57(4): 040001. Lu R S, Shi Y Q, Hu H B. Review of three-dimensional imaging techniques for robotic vision[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2020, 57(4): 040001.
- [4] Geng J. Structured-light 3D surface imaging: a tutorial[J]. *Advances in Optics and Photonics*, 2011, 3(2): 128-160.
- [5] 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. 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.
- [6] 刘路,奚冬冬,陈志健,等. 混合双频条纹投影三维测量方法[J]. *激光与光电子学进展*, 2021, 58(12): 1212001. Liu L, Xi D D, Chen Z J, et al. Three-dimensional shape measurement based on hybrid dual-frequency fringe projection[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2021, 58(12): 1212001.
- [7] 汪锦航,卢荣胜,刘端茂. 高动态范围表面自适应条纹投影测量方法[J]. *光学学报*, 2021, 41(19): 1912001. Wang J H, Lu R S, Liu D M. Adaptive fringe projection measurement method for high dynamic range surface[J]. *Acta Optica Sinica*, 2021, 41(19): 1912001.
- [8] 张海花,李勇,张启灿. 基于旋转光栅投影的动态三维面形测量方法[J]. *光学学报*, 2021, 41(23): 2312005. Zhang H H, Li Y, Zhang Q C. Dynamic 3D shape measurement based on rotating grating projection[J]. *Acta Optica Sinica*, 2021, 41(23): 2312005.
- [9] Salinas C, Montes H, Fernandez G, et al. Catadioptric panoramic stereovision for humanoid robots[J]. *Robotica*, 2012, 30(5): 799-811.
- [10] Liu Y, Ge Z D, Yuan Y T, et al. Wing deformation measurement using the stereo-vision methods in the presence of camera movements[J]. *Aerospace Science and Technology*, 2021, 119: 107161.
- [11] 束安,裴浩东,段慧仙. 空间非合作目标的三目立体视觉测量方法[J]. *光学学报*, 2021, 41(6): 0615001. Shu A, Pei H D, Duan H X. Trinocular stereo visual measurement method for spatial non-cooperative target [J]. *Acta Optica Sinica*, 2021, 41(6): 0615001.
- [12] Kaczmarek A L. 3D vision system for a robotic arm based on equal baseline camera array[J]. *Journal of Intelligent & Robotic Systems*, 2020, 99(1): 13-28.

- [13] 殷永凯, 于锴, 于春展, 等. 几何光场三维成像综述[J]. 中国激光, 2021, 48(12): 1209001.
Yin Y K, Yu K, Yu C Z, et al. 3D imaging using geometric light field: a review[J]. Chinese Journal of Lasers, 2021, 48(12): 1209001.
- [14] 于起峰, 尚洋. 摄影测量学原理与应用研究[M]. 北京: 科学出版社, 2009.
Yu Q F, Shang Y. Videometrics: principles and researches[M]. Beijing: Science Press, 2009.
- [15] Davies E R. Computer vision: principles, algorithms, applications, learning[M]. Amsterdam: Elsevier, 2017.
- [16] 张建勋, 韩明慧, 代煜. 面向低分辨率单目内窥镜图像的三维多孔结构重建[J]. 光学精密工程, 2020, 28(9): 2085-2095.
Zhang J X, Han M H, Dai Y. Three-dimensional porous structure reconstruction for low-resolution monocular endoscopic images[J]. Optics and Precision Engineering, 2020, 28(9): 2085-2095.
- [17] Martínez-Corral M, Javidi B. Fundamentals of 3D imaging and displays: a tutorial on integral imaging, light-field, and plenoptic systems[J]. Advances in Optics and Photonics, 2018, 10(3): 512-566.
- [18] Pan B, Yu L P, Zhang Q B. Review of single-camera stereo-digital image correlation techniques for full-field 3D shape and deformation measurement[J]. Science China Technological Sciences, 2018, 61(1): 2-20.
- [19] Fu K, Peng J S, He Q W, et al. Single image 3D object reconstruction based on deep learning: a review[J]. Multimedia Tools and Applications, 2021, 80(1): 463-498.
- [20] Zhang R, Tsai P S, Cryer J E, et al. Shape-from-shading: a survey[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 1999, 21(8): 690-706.
- [21] Wöhler C, d'Angelo P, Krüger L, et al. Monocular 3D scene reconstruction at absolute scale[J]. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 2009, 64(6): 529-540.
- [22] 包晓敏, 白晨. 单目三维重建技术综述[J]. 智能计算机与应用, 2020, 10(7): 49-52.
Bao X M, Bai C. Overview of monocular 3D reconstruction techniques[J]. Intelligent Computer and Applications, 2020, 10(7): 49-52.
- [23] Hartley R, Zisserman A. Multiple view geometry in computer vision[M]. 2nd ed. Cambridge: Cambridge University Press, 2004.
- [24] 李在林. 基于多视图几何的三维重建技术研究[D]. 深圳: 中国科学院深圳先进技术研究院, 2020.
Li Z L. A research of 3D reconstruction technology based on multiple view geometry[D]. Shenzhen: Shenzhen Institutes of Advanced Technology, Chinese Academy of Sciences, 2020.
- [25] 吴铮铮, 寇展. 基于单目多视角影像的场景三维重建[J]. 光学与光电技术, 2020, 18(5): 51-56.
Wu Z Z, Kou Z. 3D reconstruction of scene based on monocular multi-view image[J]. Optics & Optoelectronic Technology, 2020, 18(5): 51-56.
- [26] Wei G Q, Ma S D. Implicit and explicit camera calibration: theory and experiments[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 1994, 16(5): 469-480.
- [27] Zhou F Q, Cui Y, Peng B, et al. A novel optimization method of camera parameters used for vision measurement[J]. Optics & Laser Technology, 2012, 44(6): 1840-1849.
- [28] 李阳, 陈秀万, 王媛, 等. 基于深度学习的单目图像深度估计的研究进展[J]. 激光与光电子学进展, 2019, 56(19): 190001.
Li Y, Chen X W, Wang Y, et al. Progress in deep learning based monocular image depth estimation[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2019, 56(19): 190001.
- [29] Özyeşil O, Voroninski V, Basri R, et al. A survey of structure from motion[J]. Acta Numerica, 2017, 26: 305-364.
- [30] Lowe D G. Distinctive image features from scale-invariant keypoints[J]. International Journal of Computer Vision, 2004, 60(2): 91-110.
- [31] Snavely N, Seitz S M, Szeliski R. Photo tourism: exploring photo collections in 3D[J]. ACM Transactions on Graphics, 2006, 25(3): 835-846.
- [32] Özyeşil O, Singer A. Robust camera location estimation by convex programming[C]//2015 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, June 7-12, 2015, Boston, MA, USA. New York: IEEE Press, 2015: 2674-2683.
- [33] Zhu S Y, Zhang R Z, Zhou L, et al. Very large-scale global SfM by distributed motion averaging[C]//2018 IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, June 18-23, 2018, Salt Lake City, UT, USA. New York: IEEE Press, 2018: 4568-4577.
- [34] Bay H, Ess A, Tuytelaars T, et al. Speeded-up robust features (SURF) [J]. Computer Vision and Image Understanding, 2008, 110(3): 346-359.
- [35] Fan B, Kong Q Q, Wang X C, et al. A performance evaluation of local features for image-based 3D reconstruction[J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2019, 28(10): 4774-4789.
- [36] Hartley R, Trumpf J, Dai Y C, et al. Rotation averaging [J]. International Journal of Computer Vision, 2013, 103(3): 267-305.
- [37] Zach C, Klopschitz M, Pollefeys M. Disambiguating visual relations using loop constraints[C]//2010 IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, June 13-18, 2010, San Francisco, CA, USA. New York: IEEE Press, 2010: 1426-1433.
- [38] Tron R, Zhou X W, Daniilidis K. A survey on rotation optimization in structure from motion[C]//2016 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition Workshops, June 26-July 1, 2016, Las Vegas, NV, USA. New York: IEEE Press, 2016: 1032-1040.
- [39] Hand P, Lee C, Voroninski V. ShapeFit: exact location recovery from corrupted pairwise directions[J]. Communications on Pure and Applied Mathematics, 2018, 71(1): 3-50.
- [40] Govindu V M. Lie-algebraic averaging for globally consistent motion estimation[C]//Proceedings of the 2004 IEEE Computer Society Conference on Computer

- Vision and Pattern Recognition, 2004. CVPR 2004, June 27-July 2, 2004, Washington, DC, USA. New York: IEEE Press, 2004: 684-691.
- [41] Arrigoni F, Fusiello A, Rossi B. Camera motion from group synchronization[C]//2016 Fourth International Conference on 3D Vision (3DV), October 25-28, 2016, Stanford, CA, USA. New York: IEEE Press, 2016: 546-555.
- [42] Havlena M, Torii A, Pajdla T. Efficient structure from motion by graph optimization[M]//Daniilidis K, Maragos P, Paragios N. Computer Vision-ECCV 2010. Lecture notes in computer science. Heidelberg: Springer, 2010, 6312: 100-113.
- [43] Ge K L, Hu H, Feng J J, et al. Depth estimation using a sliding camera[J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2016, 25(2): 726-739.
- [44] Agarwal S, Snavely N, Simon I, et al. Building Rome in a day[C]//2009 IEEE 12th International Conference on Computer Vision, September 29-October 2, 2009, Kyoto, Japan. New York: IEEE Press, 2009: 72-79.
- [45] Jiang S, Jiang C, Jiang W S. Efficient structure from motion for large-scale UAV images: a review and a comparison of SfM tools[J]. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 2020, 167: 230-251.
- [46] Goldstein T, Hand P, Lee C, et al. ShapeFit and ShapeKick for robust, scalable structure from motion [M]//Leibe B, Matas J, Sebe N, et al. Computer vision-ECCV 2016. Lecture notes in computer science. Berlin: Springer, 2016, 9911: 289-304.
- [47] Lippmann G. Épreuves réversibles donnant la sensation du relief[J]. Journal De Physique Théorique et Appliquée, 1908, 7(1): 821-825.
- [48] Davies N, McCormick M, Yang L. Three-dimensional imaging systems: a new development[J]. Applied Optics, 1988, 27(21): 4520-4528.
- [49] Arimoto H, Javidi B. Integral three-dimensional imaging with digital reconstruction[J]. Optics Letters, 2001, 26(3): 157-159.
- [50] Xiao X, Javidi B, Martinez-Corral M, et al. Advances in three-dimensional integral imaging: sensing, display, and applications[J]. Applied Optics, 2013, 52(4): 546-560.
- [51] Yoo H. Axially moving a lenslet array for high-resolution 3D images in computational integral imaging[J]. Optics Express, 2013, 21(7): 8873-8878.
- [52] Xing Y, Xiong Z L, Zhao M, et al. Real-time integral imaging pickup system using camera array[J]. Proceedings of SPIE, 2018, 10556: 105560D.
- [53] Schulein R, Daneshpanah M, Javidi B. 3D imaging with axially distributed sensing[J]. Optics Letters, 2009, 34(13): 2012-2014.
- [54] Xiao X, Javidi B. Axially distributed sensing for three-dimensional imaging with unknown sensor positions[J]. Optics Letters, 2011, 36(7): 1086-1088.
- [55] Cho M, Javidi B. Three-dimensional photon counting axially distributed image sensing[J]. Journal of Display Technology, 2013, 9(1): 56-62.
- [56] Piao Y R, Zhang M, Shin D, et al. Three-dimensional imaging and visualization using off-axially distributed image sensing[J]. Optics Letters, 2013, 38(16): 3162-3164.
- [57] Zhang M, Piao Y R, Kim N W, et al. Distortion-free wide-angle 3D imaging and visualization using off-axially distributed image sensing[J]. Optics Letters, 2014, 39(14): 4212-4214.
- [58] Piao Y R, Qu H J, Zhang M, et al. Three-dimensional integral imaging display system via off-axially distributed image sensing[J]. Optics and Lasers in Engineering, 2016, 85: 18-23.
- [59] Shin D, Javidi B. Three-dimensional integral imaging with improved visualization using subpixel optical ray sensing[J]. Optics Letters, 2012, 37(11): 2130-2132.
- [60] Zhang M, Zhong Z L, Piao Y R, et al. Three-dimensional integral imaging with circular non-uniform distribution[J]. Optics and Lasers in Engineering, 2020, 126: 105912.
- [61] 周富强, 王晔昕, 柴兴华, 等. 镜像双目视觉精密测量技术综述[J]. 光学学报, 2018, 38(8): 0815003. Zhou F Q, Wang Y X, Chai X H, et al. Review on precise measurement technology based on mirror binocular vision[J]. Acta Optica Sinica, 2018, 38(8): 0815003.
- [62] Zhang Z Y, Tsui H T. 3D reconstruction from a single view of an object and its image in a plane mirror[C]// Proceedings of Fourteenth International Conference on Pattern Recognition, August 20, 1998, Brisbane, QLD, Australia. New York: IEEE Press, 1998: 1174-1176.
- [63] Feng X F, Pan D F. Research on the application of single camera stereo vision sensor in three-dimensional point measurement[J]. Journal of Modern Optics, 2015, 62(15): 1204-1210.
- [64] Gluckman J, Nayar S K. Catadioptric stereo using planar mirrors[J]. International Journal of Computer Vision, 2001, 44(1): 65-79.
- [65] Ying X H, Peng K, Hou Y B, et al. Self-calibration of catadioptric camera with two planar mirrors from silhouettes[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2013, 35(5): 1206-1220.
- [66] Gluckman J, Nayar S K. Rectified catadioptric stereo sensors[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2002, 24(2): 224-236.
- [67] Pachidis T P, Lygouras J N. Pseudostereo-vision system: a monocular stereo-vision system as a sensor for real-time robot applications[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2007, 56(6): 2547-2560.
- [68] Inaba M, Hara T, Inoue H. A stereo viewer based on a single camera with view-control mechanisms[C]// Proceedings of 1993 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS '93), July 26-30, 1993, Yokohama, Japan. New York: IEEE Press, 1993: 1857-1865.
- [69] Zhou F Q, Chai X H, Chen X, et al. Omnidirectional stereo vision sensor based on single camera and catoptric system[J]. Applied Optics, 2016, 55(25): 6813-6820.

- [70] Ng W B, Zhang Y. Stereoscopic imaging and reconstruction of the 3D geometry of flame surfaces[J]. *Experiments in Fluids*, 2003, 34(4): 484-493.
- [71] Xue T, Qu L Q, Wu B. Matching and 3-D reconstruction of multibubbles based on virtual stereo vision[J]. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 2014, 63(6): 1639-1647.
- [72] Pan B, Yu L P, Yang Y Q, et al. Full-field transient 3D deformation measurement of 3D braided composite panels during ballistic impact using single-camera high-speed stereo-digital image correlation[J]. *Composite Structures*, 2016, 157: 25-32.
- [73] Yu L P, Pan B. Single-camera high-speed stereo-digital image correlation for full-field vibration measurement[J]. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2017, 94: 374-383.
- [74] Hu S P, Matsumoto Y, Takaki T, et al. Monocular stereo measurement using high-speed catadioptric tracking [J]. *Sensors*, 2017, 17(8): 1839.
- [75] Yagi Y, Yachida M. Real-time omnidirectional image sensors[J]. *International Journal of Computer Vision*, 2004, 58(3): 173-207.
- [76] Southwell D, Basu A, Fiala M, et al. Panoramic stereo [C]//*Proceedings of 13th International Conference on Pattern Recognition*, August 25-29, 1996, Vienna, Austria. New York: IEEE Press, 1996: 378-382.
- [77] Jang G, Kim S, Kweon I. Single-camera panoramic stereo system with single-viewpoint optics[J]. *Optics Letters*, 2006, 31(1): 41-43.
- [78] Li W M, Li Y F. Single-camera panoramic stereo imaging system with a fisheye lens and a convex mirror [J]. *Optics Express*, 2011, 19(7): 5855-5867.
- [79] Chen S Y, Xiang Z Y, Zou N, et al. Multi-stereo 3D reconstruction with a single-camera multi-mirror catadioptric system[J]. *Measurement Science and Technology*, 2020, 31(1): 015102.
- [80] Lee D, Kweon I. A novel stereo camera system by a biprism[J]. *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, 2000, 16(5): 528-541.
- [81] Lim K B, Xiao Y. Virtual stereovision system: new understanding on single-lens stereovision using a biprism [J]. *Journal of Electronic Imaging*, 2005, 14(4): 043020.
- [82] Wu L F, Zhu J G, Xie H M. A modified virtual point model of the 3D DIC technique using a single camera and a bi-prism[J]. *Measurement Science and Technology*, 2014, 25(11): 115008.
- [83] Cui X Y, Zhao Y, Lim K B, et al. Perspective projection model for prism-based stereovision[J]. *Optics Express*, 2015, 23(21): 27542-27557.
- [84] Lim K B, Qian B B. Biprism distortion modeling and calibration for a single-lens stereovision system[J]. *Journal of the Optical Society of America A*, 2016, 33(11): 2213-2224.
- [85] Cui X Y, Fan H Y, Chen H S, et al. Epipolar geometry for prism-based single-lens stereovision[J]. *Machine Vision and Applications*, 2017, 28(3/4): 313-326.
- [86] Kuznetsov A O, Gorevoy A V, Machikhin A S. Image rectification for prism-based stereoscopic optical systems [J]. *Computer Vision and Image Understanding*, 2019, 182: 30-37.
- [87] Chen C Y, Yang T T, Sun W S. Optics system design applying a micro-prism array of a single lens stereo image pair[J]. *Optics Express*, 2008, 16(20): 15495-15505.
- [88] Deng Q L, Chen C Y, Cheng S W, et al. Micro-prism type single-lens 3D aircraft telescope system[J]. *Optics Communications*, 2012, 285(24): 5001-5007.
- [89] Yang S P, Kim J J, Jang K W, et al. Compact stereo endoscopic camera using microprism arrays[J]. *Optics Letters*, 2016, 41(6): 1285-1288.
- [90] Sun W S, Tien C L, Chu P Y, et al. Optimization design of a stereo-photographic system based on achromatic double-prism arrays[J]. *Applied Optics*, 2018, 57(27): 8034-8043.
- [91] Gao C Y, Ahuja N. Single camera stereo using planar parallel plate[C]//*Proceedings of the 17th International Conference on Pattern Recognition*, 2004. ICPR 2004, August 26, 2004, Cambridge, UK. New York: IEEE Press, 2004: 108-111.
- [92] Gao C Y, Ahuja N. A refractive camera for acquiring stereo and super-resolution images[C]//*2006 IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, June 17-22, 2006, New York, NY, USA. New York: IEEE Press, 2006: 2316-2323.
- [93] Jang K W, Yang S P, Baek S H, et al. Electrothermal MEMS parallel plate rotation for single-imager stereoscopic endoscopes[J]. *Optics Express*, 2016, 24(9): 9667-9672.
- [94] Baek S H, Kim M H. Stereo fusion: combining refractive and binocular disparity[J]. *Computer Vision and Image Understanding*, 2016, 146: 52-66.
- [95] Li A H, Liu X S, Zhao Z S. Compact three-dimensional computational imaging using a dynamic virtual camera[J]. *Optics Letters*, 2020, 45(13): 3801-3804.
- [96] Li A H, Zhong S Z. Calibration method of Risley-prism imaging system[J]. *Optics Communications*, 2020, 459: 124975.
- [97] Liu X S, Li A H. Multiview three-dimensional imaging using a Risley-prism-based spatially adaptive virtual camera field[J]. *Applied Optics*, 2022, 61(13): 3619-3629.
- [98] Trivi M, Rabal H J. Stereoscopic uses of diffraction gratings[J]. *Applied Optics*, 1988, 27(6): 1007-1009.
- [99] Henao R, Medina F, Rabal H J, et al. Three-dimensional speckle measurements with a diffraction grating[J]. *Applied Optics*, 1993, 32(5): 726-729.
- [100] Pan B, Ma L J, Xia Y. A novel technique for measuring 3D deformation of adhesively bonded single lap joint[J]. *Science China Physics, Mechanics & Astronomy*, 2015, 59(1): 614601.
- [101] Xia S M, Pan Z P, Zhang J W. Optical microscope for three-dimensional surface displacement and shape measurements at the microscale[J]. *Optics Letters*, 2014, 39(14): 4267-4270.
- [102] Nickerson E K, Berke R B. Ultraviolet diffraction assisted image correlation (UV-DAIC) for single-camera 3D strain measurement at extreme temperatures[J].

- Experimental Mechanics, 2018, 58(6): 885-892.
- [103] Ser J I, Jang J Y, Cha S, et al. Applicability of diffraction grating to parallax image array generation in integral imaging[J]. Applied Optics, 2010, 49(13): 2429-2433.
- [104] Jang J Y, Ser J I, Kim E S. Wave-optical analysis of parallax-image generation based on multiple diffraction gratings[J]. Optics Letters, 2013, 38(11): 1835-1837.
- [105] Jang J Y, Yoo H. Computational reconstruction for three-dimensional imaging via a diffraction grating[J]. Optics Express, 2019, 27(20): 27820-27830.
- [106] Jang J Y, Yoo H. Computational three-dimensional imaging system via diffraction grating imaging with multiple wavelengths[J]. Sensors, 2021, 21(20): 6928.
- [107] 石岩青, 常彩霞, 刘小红, 等. 面阵相机内外参数标定方法及进展[J]. 激光与光电子学进展, 2021, 58(24): 2400001.
Shi Y Q, Chang C X, Liu X H, et al. Calibration methods and progress for internal and external parameters of area-array camera[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2021, 58(24): 2400001.
- [108] Chen C, Yang F L, Pan B. Model-free method for intrinsic camera parameters calibration and lens distortion correction[J]. Optical Engineering, 2021, 60(10): 104102.
- [109] Zhou F Q, Wang Y X, Peng B, et al. A novel way of understanding for calibrating stereo vision sensor constructed by a single camera and mirrors[J]. Measurement, 2013, 46(3): 1147-1160.
- [110] Li X, Li W, Ma X, et al. Spatial light path analysis and calibration of four-mirror-based monocular stereo vision [J]. Optics Express, 2021, 29(20): 31249-31269.
- [111] Marcató J, Jr, Tommaselli A M G, Moraes M V A. Calibration of a catadioptric omnidirectional vision system with conic mirror[J]. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 2016, 113: 97-105.
- [112] Genovese K, Casaletto L, Rayas J A, et al. Stereo-Digital Image Correlation (DIC) measurements with a single camera using a biprism[J]. Optics and Lasers in Engineering, 2013, 51(3): 278-285.
- [113] Wu L F, Zhu J G, Xie H M, et al. An accurate method for shape retrieval and displacement measurement using Bi-prism-based single lens 3D digital image correlation [J]. Experimental Mechanics, 2016, 56(9): 1611-1624.
- [114] Cui X Y, Lim K B, Zhao Y, et al. Single-lens stereovision system using a prism: position estimation of a multi-ocular prism[J]. Journal of the Optical Society of America A, 2014, 31(5): 1074-1082.
- [115] Gorevoy A V, Machikhin A S, Khokhlov D D, et al. Optimization of prism-based stereoscopic imaging systems at the optical design stage with respect to required 3D measurement accuracy[J]. Optics Express, 2020, 28(17): 24418-24430.
- [116] Liu X S, Li A H. An integrated calibration technique for variable-boresight three-dimensional imaging system[J]. Optics and Lasers in Engineering, 2022, 153: 107005.
- [117] 左超, 冯世杰, 张翔宇, 等. 深度学习下的计算成像: 现状、挑战与未来[J]. 光学学报, 2020, 40(1): 0111003.
Zuo C, Feng S J, Zhang X Y, et al. Deep learning based computational imaging: status, challenges, and future[J]. Acta Optica Sinica, 2020, 40(1): 0111003.