

基于光学显微视觉的精密定位测量综述(特邀)

赵晨阳*, 向捷, 卞凯, 朱子健, 万庆红

哈尔滨工业大学(深圳)机电工程与自动化学院, 广东 深圳 518057

摘要 精密定位测量旨在针对微动目标实现微纳米精度的定位与小尺度操纵,其作为一种重要的测量技术,在工业生产、半导体制造等高端装备领域得到广泛应用。与其他测量方法不同,光学显微视觉测量技术因具备交互性强、扩展性强的特征而广泛应用于精密测量中。对基于光学显微视觉的精密定位测量技术进行分析与综述。首先,介绍光学显微视觉系统的成像模型与工作原理。其次,根据是否基于标靶图案的特征,对显微定位测量算法进行分类;同时,根据标靶图案的周期特征进行进一步的分类与探究,讨论其在不同标靶图案下的性能指标。最后,总结光学显微视觉定位测量方法在不同领域的应用与前景。该综述旨在为研究人员提供关于光学显微视觉精密定位测量技术的发展状态与趋势,促进微纳尺度定位测量技术的发展。

关键词 光学系统; 精密定位测量; 显微视觉; 微纳尺度

中图分类号 O436

文献标志码 A

DOI: 10.3788/LOP231924

Review of Optical Microvision-Based Precision Positioning Measurement (Invited)

Zhao Chenyang*, Xiang Jie, Bian Kai, Zhu Zijian, Wan Qinghong

School of Mechanical Engineering and Automation, Harbin Institute of Technology (Shenzhen),
Shenzhen 518057, Guangdong, China

Abstract Precision positioning measurements are performed to achieve micro- and nano-accuracy in positioning and small-scale manipulation for microscale objects. This technology plays a crucial role in various high-end industries, including industrial production and semiconductor manufacturing. Owing to their versatility and interactive capabilities, optical microvision-based measurement techniques are widely employed in precision positioning. This paper presents an analysis and synthesis of precision positioning measurement techniques based on optical micro vision. First, we introduced the imaging models and operational principles of optical micro-vision systems. Then, microlocalization measurement algorithms were categorized based on their reliance on target patterns. Additionally, these algorithms were classified and explored based on the periodic characteristics of target patterns. Moreover, the performance metrics of positioning measurement algorithms for different target patterns were discussed. Finally, the applications and future prospects of optical microvision-based precision positioning measurement methods across various domains were summarized. This review provides researchers insights into the current state and emerging trends in optical microvision-based precision positioning measurement technology, thereby advancing the field of microscale/nanoscale positioning measurement.

Key words optical system; precise positioning measurement; micro vision; micro-nano scale

1 引言

精密定位测量指确定对象相对于参考点的精确位置的技术,其精度通常定义为分辨率高于 $0.1 \mu\text{m}$ 或相对定位误差(误差/测量长度)小于 10^{-6} [1]。近年来随着先进制造和高端装备的需求不断提高,精密定位测量技术逐渐受到广泛关注并被应用于各种领域,如半

导体检测与封装[2]、小型机器人微操作[3]、超精密数控机床定位[4]等。定位精度、运动行程、响应频率及测量自由度作为精密定位测量技术的关键指标,决定着高端产品的性能及其应用场景。从数控机床定位技术到光刻机晶圆双工件台,虽然不同产品与应用对定位测量性能指标要求不同,但如何同时提高这4个测量指标一直以来是精密定位测量技术的难题。传统的接触

收稿日期: 2023-08-15; 修回日期: 2023-09-12; 录用日期: 2023-10-13; 网络首发日期: 2023-10-23

基金项目: 国家自然科学基金(52005135)、中国科协青年精英科学家资助计划(YESS20210161)

通信作者: *zhaochenyang@hit.edu.cn

式测量,如三坐标测量机等,已经逐步被激光干涉仪与光栅编码器取代。激光干涉测量以激光波长为已知长度,利用迈克耳孙干涉系统测量物体位移。由于激光具有高强度、高度方向性、空间同调性、窄带宽和高度单色性等优点,激光干涉仪的定位精度能够达 $1/100$ 波长(约 6 nm),普遍应用到各种精密定位测量系统中。尽管双频激光干涉仪一定程度上克服了单频激光受空气湍流、机床油雾、切削屑等环境问题影响的难题^[5],但是激光干涉技术局限于单自由度测量,由于阿贝误差与累计误差的存在,其自由度的增大往往伴随着更为复杂的结构、更为苛刻的环境、更为严格的加工和装配精度。光电编码通过利用光栅莫尔条纹变换和光电转换,能够测量线性或角度位移,广泛应用于数控机床、回转台、伺服传动、机器人、雷达等装置和设备中^[6]。利用电子细分技术,其线性及角度分辨率分别能够达 $0.1\text{ }\mu\text{m}$ 和 $0.5\text{ }\mu\text{rad}$ 。然而光栅制造精度决定测量精度且受制造工艺限制,其测量行程较小(4 m 以内);同时,由于无法完全避免加工误差,光栅及光电编码器校准成本高,受外部环境影响较为严重。

视觉测量技术通过 CCD 或 CMOS 传感器进行成像并将结果传输给计算机,并通过一系列的图像处理方式提取图像信息。由于具备强鲁棒性和可开发性的特点,视觉测量技术已经逐步被采纳并成为实现精密定位测量的主流方法。相较于宏观视觉成像,显微视觉成像技术更改了透镜组合,使自己具备微观成像能力与微米级甚至纳米级的成像精度。第一台数字显微镜于 1986 年在日本出售,其能通过计算机图像处理技术对观测结果进行解析。随着工业领域与生物领域研究的不断突破,如今涌现出各种各样高成像质量显微镜,如光学显微镜、电子显微镜、原子力显微镜、荧光显微镜、扫描探针显微镜及超分辨率显微镜等。虽然它们具备超分辨率成像特性且能突破光学衍射极限,但诸如扫描探针显微镜与原子力显微镜等类别的生物成像显微镜因庞大的体积与复杂的操作流程而不适用于工业测量领域。电子显微镜广泛用于生物观测、微小零件缺陷检测等领域^[7-8],其工作原理是:电子枪产生的自由电子被电场加速,通过聚光镜形成纳米级分辨率的聚焦电子束;当电子束撞击真空室定位台上的样品表面时,生成几种关于材料形貌的相互作用信息,监视器收集生成数字图像。真空室定位台的体积限制了电子显微镜的工作范围,使得电子显微镜只适用于对独立小样本的检测。而光学显微镜结构简易且安装灵活,更能容易实现实时的视觉伺服纳米操作。因此本文主要回顾与总结光学显微镜下的精密视觉定位测量技术。与激光干涉仪或光栅编码器等其他非接触测量技术相比,视觉显微精密定位测量技术具备以下优点和良好的性能。

1) 信息获取量高^[9]。获取的图像中除包含目标位姿、尺寸等信息外,还包含光强、几何形态等信息,为后

续大数据处理提供丰富资源,通过先进的图像处理算法能获取充足的信息辅助测量。

2) 系统集成度高^[10]。相比激光干涉方法,视觉系统安装方便,从而简化零部件,减少对装配和外部环境的要求,降低成本,提高了视觉测量的可达性与实用性。

3) 更新换代容易^[11]。减少了对硬件的依赖,通过数据库及算法的改进可以提高测量的精度和适用性。

在显微视觉领域,Yao 等^[12]对显微视觉测量原理、特点及应用进行了详细的总结。但是目前仍然缺少关于工业定位技术的显微视觉测量技术综述。本文旨在全面回顾显微视觉定位测量方法在微纳制造、平台定位、生物测量等方面的进展并做出清晰的分类。主要阐述光学显微系统成像原理与成像模型,包括 CCD/CMOS 显微成像模型与光学显微系统光照模型;从测量图案的角度对显微视觉精密定位测量方法进行分类与性能对比;主要介绍显微视觉精密定位测量的应用并进行总结与展望。

2 光学显微系统成像模型

光学显微系统由光学镜头、CCD/CMOS 传感器和光源 3 大部分组成。镜头参数决定系统的放大倍数和数值孔径,同时决定系统的工作距离和景深。CCD/CMOS 传感器决定系统像素尺寸、成像质量及采集帧率。而光源的照明方式、光照强度及波长直接影响成像质量与成像分辨率。因此不同的光学显微参数配置中,光照模型和成像模型直接影响图像分辨率和视觉定位精度。

2.1 光学显微系统光照模型

光学显微系统照明可划分为两类:反射光照明与透射光照明。透射光照明方式中光源和物镜位于载物台不同侧面,透射光穿过目标和载玻片射入物镜。由于生物与细胞往往是透明的,透射光照明在生物医学领域广泛使用。在定位测量领域,利用透射式光源照射镀膜光刻的标靶,透光区域和不透光区域的边界能形成大对比度,易于边缘提取。在反射光照明中,光源与物镜位于目标同侧,光照模型按照光的相干性可分为相干光成像与非相干光成像。相干光通过特定的调制方式形成,如荧光显微镜、相差显微镜等。在精密定位测量领域,为了配合被测对象的运动以及实现多自由度测量,显微系统的结构应尽可能简易且体积应尽可能小。因此通常使用可见光等非相干光来完成成像。最常见的两种非相干光成像方式为明场成像与暗场成像,如图 1 所示。为了保证匀光性,通常采用同轴光科勒照明的形式^[13]。明场成像中,光源垂直入射到物体表面,其反射光被物镜捕捉,物体整个表面被照亮。而在暗场成像中,通过遮挡片遮挡住同轴光的中心部分,光以一定的入射角射入对象并在目标形貌突变处发生散射,此时利用物镜捕获散射光并通过透镜

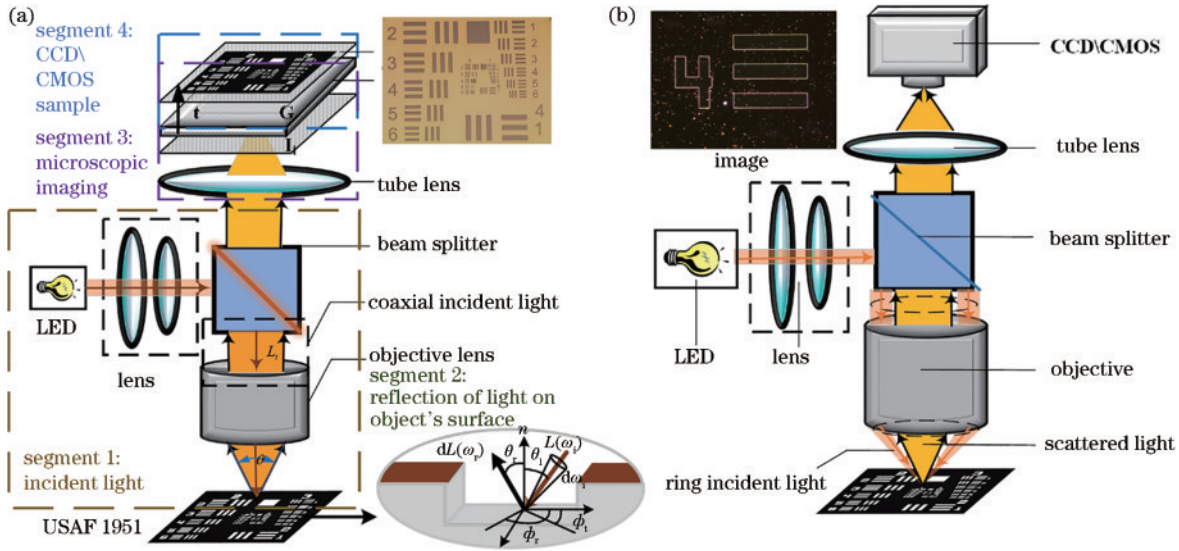


图 1 光学显微视觉测量系统中两种常用的光照模型。(a) 明场成像模型；(b) 暗场成像模型

Fig. 1 Two commonly used illumination models in optical micro-vision-based measurement system. (a) Bright-field imaging model; (b) dark-field imaging model

完成成像。因此,暗场成像有助于突显目前形貌信息与边缘特征。

2.1.1 光学明场成像模型

明场成像光在物体表面的反射是投射到物体上的光波反射到显微镜镜头的过程。为了保证照明的均匀性,提高测量精度,目前绝大部分定位测量采用同轴光明场成像的形式^[14]。表面反射模型可以求解反射光照强度的分布,该模型与具体的照明方式、物体的表面形貌和反射率有关。从辐射测量的角度来看,表面反射模型可以通过双向反射分布函数(BRDF)来描述^[15]。BRDF建立了反射辐射和入射辐射分布之间的关系。假设BRDF描述为 f_r ,其表达式为

$$f_r(\omega_i, \omega_r) = \frac{dL(\omega_r)}{dE(\omega_i)} = \frac{dL(\omega_r)}{L(\omega_i) \cos \theta_i d\omega_i} = \frac{dL(\omega_r)}{L^i \cos \theta_i d\omega_i}, \quad (1)$$

式中: ω_i 和 ω_r 分别表示入射方向和反射方向; (θ_i, ϕ_i) 和 (θ_r, ϕ_r) 是 ω_i 和 ω_r 的详细描述; $L(\omega_i)$ 为入射辐照度,即照明强度,由于柯勒照明具有照度均匀性,任何方向的入射辐照度都是相同的,即 $L(\omega_i) = L^i$; $L(\omega_r)$ 是反射辐照度。

由图1(a)可知,显微系统物镜收集到的反射光成像角度范围为 2θ 内,其中 $\theta = \arcsin(NA/n)$, n 为物镜的折射率。因此物体表面任意微元的反射辐照度可表示为

$$L^r = \int_{\Omega} dL(\omega_r) = \int_{\Omega} f_r(\omega_i, \omega_r) L^i (n \cdot \omega_i) d\omega_i = L^i \int_0^{2\pi} \int_0^{2\theta} f_r(\omega_i, \omega_r) \cos \theta_i \sin \theta_i d\theta_i d\phi_i. \quad (2)$$

光在物体表面反射的强度分布表示为 I_g ,它与辐射分布成正比。将比例因子表示为 μ , I_g 可写为

$$I_g(x_0, y_0) = \mu L^r, \quad (3)$$

式中: (x_0, y_0) 为像方坐标。

通过式(1)~(3)再结合物体表面的形貌,可以推导出光学显微系统明场成像下近场的光强分布模型。此模型能够对光学成像进行仿真与分析,并得到物体表面形貌光学成像的特征表达,从而为视觉测量系统的光照优化提供一定的理论指导。

2.1.2 光学暗场成像模型

暗场成像中,环形照明光以广角投射到样品表面,有效阻挡明亮的背景照明并增强暗部细节的可见度^[16]。暗场成像擅长捕获高频成像信息,例如来自样品的散射光和衍射光,与明场成像相比,可实现更出色的细节表达,显著增加了样本的边缘对比度^[17]。利用这一特性,暗场成像在微缺陷识别和测量中得到了广泛的应用。Chai等^[18]和Zhang等^[19]采用暗场成像检测缺陷并测量大型光学表面上的线宽。Mehta等^[20]开发了一种使用暗场成像检测小特征纳米级结构变化的方法。本团队在以往研究工作^[21]中首次将暗场成像理论应用于定位测量并得到了小于10 nm的定位精度。由于来自目标的散射光难以构建表达式进行具体的描述,因此众多学者采用时域有限差分(FDTD)法来实现对暗场成像中近场光强的仿真。

暗场成像中,光以一定的角度斜射,当物体表面存在形貌突变时,光会发生散射,其散射场代表暗场成像中近场散射光强分布。近场光经显微成像透镜作用在CCD/CMOS端形成远场光,通过CCD/CMOS离散采样得到二维数字图像。Chai等^[18]采用FDTD仿真平台对表面微缺陷暗场成像进行仿真,如图2(a)所示。Zhu等^[21]对分辨率板刻蚀台阶形貌进行仿真,如图2(b)所示。其中 E_i 、 E_r 和 E_s 分别代表入射光、反射

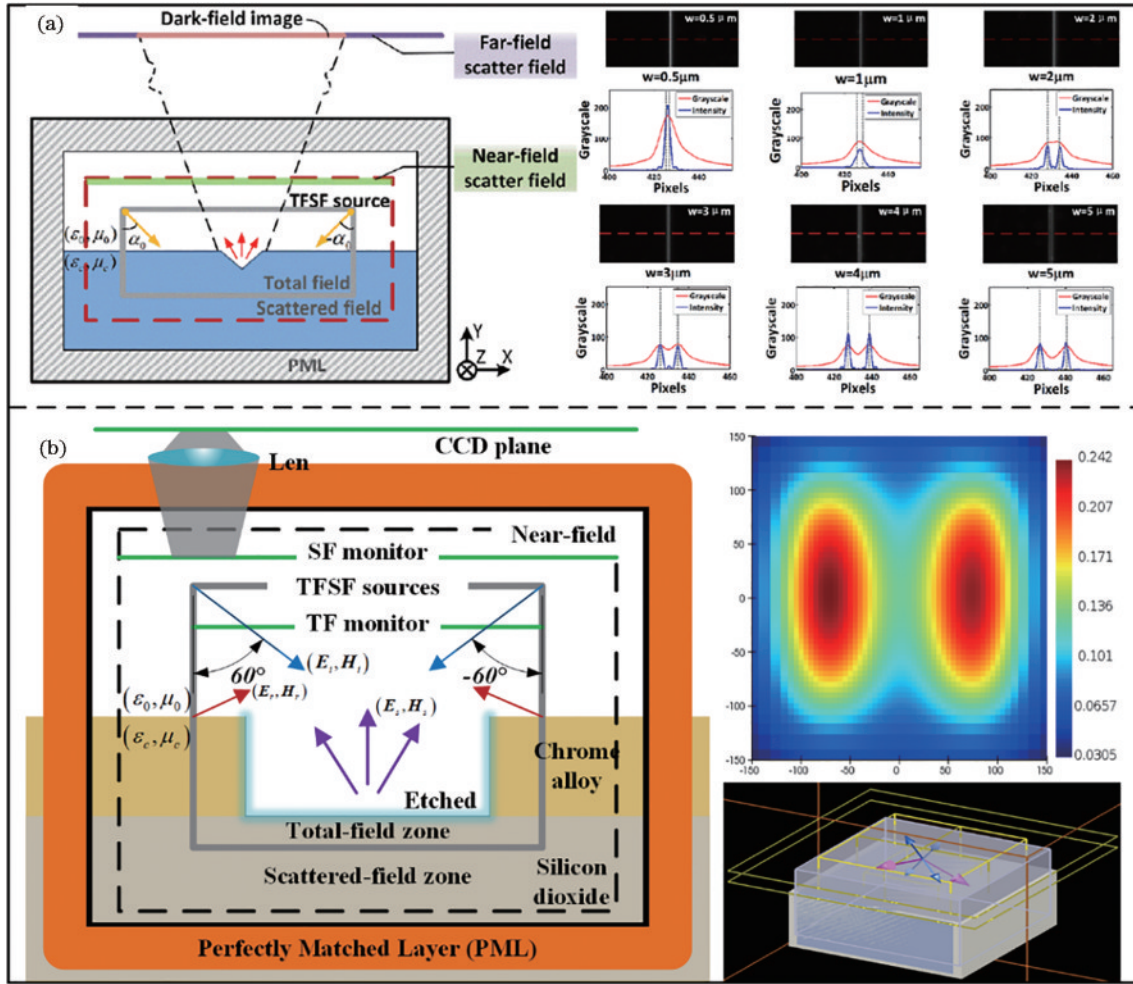


图 2 暗场成像仿真。(a) 针对缺陷表面的仿真及得到的光强分布^[18]; (b) 针对刻蚀表面台阶形貌的仿真及近场光强分布^[21]
 Fig. 2 Dark-field imaging simulation. (a) Simulation of the defect surface and light intensity distribution^[18]; (b) simulation of the etched surface step morphology and near-field light intensity distribution^[21]

光和散射光的电场强度分布, H_i 、 H_r 和 H_s 分别代表入射光、反射光和散射光的磁场强度分布, ϵ_0 和 μ_0 分别代表介电常数和磁导率。设置总场监视器与散射场监视器来观察近场电场分布。

2.1.3 光学点扩散函数

假设光学镜片的加工质量是完美的,但由于高频信号的传输有限,光学衍射的存在仍然会导致图像模糊^[22],这一现象可以通过成像分辨率函数来解释。在圆形镜头的情况下,一个理想的物点被近似为空间中的一个点光源,像平面上的图像理想近似为这些空间点光源成像的组合,显微光学系统对理想点光源的响应被描述为点扩散函数(PSF)^[23]。荧光显微镜 PSF 由文献[24-25]给出,在非相干光显微成像系统中,不同学者针对不同需求提出了不同的 PSF 模型。如表 1 所示,Gaussian PSF 最简化的描述即运用 2D 高斯函数模拟模糊效果。高斯方差随离艾里斑中心点的距离变化线性变化。Sage 等^[26]通过调制高斯函数模拟傅里叶域中的散焦,其高斯方差随离艾里斑中心点的距离变化线性变化且 ω 是径向频率。同时 Born & Wolf 模型

描述了聚焦与离焦时在显微镜中发生的基于标量的衍射^[27]。散焦模型与离焦模型中,成像平面不需要对焦,故而扩大了成像系统的景深。事实上,光学传递函数为相干传递函数的自相关函数,且强度点扩散函数为复振幅点扩散函数模的平方,根据夫琅禾费衍射原理,相干传递函数可表示为系统的光瞳函数。圆形光瞳的相干光传递函数服从圆域函数分布,故而复振幅 PSF 服从圆域函数的傅里叶逆变换,即一阶一类贝塞尔函数 $J_1(\cdot)$,因此圆形光瞳的 PSF 还可根据系统硬件参数描述为镜头直径 D 、光波长 λ 、焦距 f_c 、工作距离 f 和折射率 n 的关系^[21]。利用此关系,能根据系统硬件估计成像性能且此关系易于仿真,同样也可以推导出方形光瞳的 PSF 模型表达式。

显微镜的硬件参数,如 NA、放大倍率、口径大小等,决定了 PSF 并直接影响成像分辨率与景深,公式为

$$r = \frac{\lambda}{2NA}, \quad (4)$$

式中 r 表示图像分辨率。系统景深可表示为

表 1 不同模型 PSF 表达式

Table 1 Different PSF expressions of models

PSF model	Feature	Expression
Gaussian PSF (3D)	Simple and intuitive	$h(x, y, z) = \frac{1}{\sigma(z)^2} e^{-\frac{x^2+y^2}{2\sigma(z)^2}}$
Defocused PSF (3D) [26]	Extended depth of field	$h(\omega, z) = e^{-\sigma(z)^2 \cdot \omega^2} \cdot \frac{\sin \zeta(\omega, z)}{\zeta(\omega, z)} \cdot \zeta(\omega, z) = \frac{z \cdot \omega (1 - \omega)}{K(z, -z)}$
Born and Wolf PSF (3D) [27]	Extended depth of field	$h(x, y, z) = \left C \int_0^1 J_0 \left[k \frac{NA}{n} (x^2 + y^2)^{0.5} \rho \right] e^{-\frac{1}{2} i k \rho^2 z \left(\frac{NA}{n} \right)^2} \rho d\rho \right ^2$
Circular pupil PSF (2D) [21]	Easy to simulate	$h(x, y) \propto \left \frac{\lambda f D}{\sqrt{x^2 + y^2}} J_1 \left[\frac{2\pi}{\lambda} \left(\frac{D}{f_c} - \frac{2}{\sqrt{n^2/NA^2 - 1}} \right) \sqrt{x^2 + y^2} \right] \right ^2$
Square pupil PSF (2D)	Easy to simulate	$h(x, y) \propto \left \frac{\lambda f D}{\sqrt{x^2 + y^2}} \text{sinc} \left[\frac{2\pi}{\lambda} \left(\frac{D}{f_c} - \frac{2}{\sqrt{n^2/NA^2 - 1}} \right) \sqrt{x^2 + y^2} \right] \right ^2$

$$d = \frac{\lambda \times n}{NA^2} + \frac{n}{M \times NA} \times e, \quad (5)$$

式中: M 为系统整体放大倍数; e 为检测器能分辨的最小距离。

成像分辨率函数描述了光学衍射极限的存在, 由于 NA 的限制, 目前普通显微镜的成像分辨率在 200 nm 左右。更小的波长意味着更高的分辨率, 因此在高精度成像领域通常采用紫外光或是极紫外光的形式, 而在可见光的范畴则可以采用蓝紫光来提高成像分辨率。同时, 更大的 NA 在 PSF 中意味着半径更小的艾里斑, 即更高的成像质量。一般油镜中的 NA 能大于 1, 但是工业显微系统镜头暴露在空气中, 数值在 0.25~0.75 波动, 更大的 NA 带来更大的放大倍率, 有助于提高定位精度。但是, 高倍率系统具有较小景深, 这对系统整体的平面度与平行度有极高的要求。因此, 提高系统定位精度的关键在于构建显微相机成像模型并实现高精度的系统标定。

2.2 光学显微系统成像模型

显微相机标定是精密定位测量的前提。相机标定指构建空间三维坐标点与相机二维像素坐标的映射关系, 从而通过非线性优化的步骤求解相机参数, 包括相机内参、相机外参及相机畸变参数的过程。与宏观相机模型类似, 显微相机成像模型遵循仿射变换原理。传统的显微相机模型有两种, 即透视投影与平行投影, 如图 3 所示。在光学显微成像系统中, 不同的透镜与不同的放大倍率适用于不同的模型, 如表 2 所示。

2.2.1 透视投影模型

图 3(a) 展示了透视投影的过程。三维世界坐标系中的点 $P(X, Y, Z)$ 、图像像素坐标系中的点 $p(u, v)$ 、光心 O_c 满足三点一线的约束。因此透视投影模型可描述为

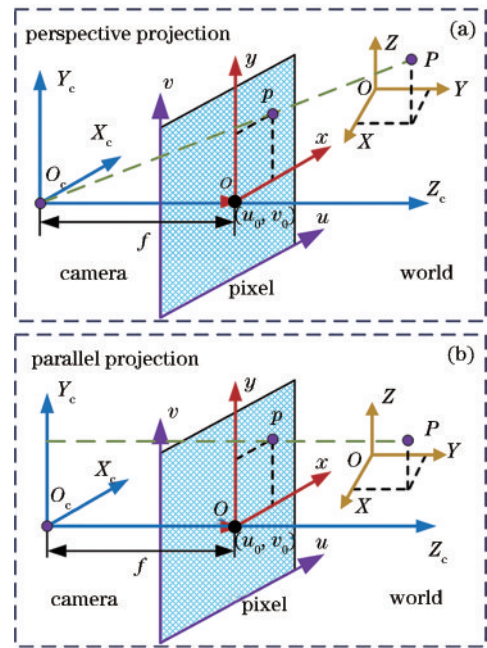


图 3 成像模型。(a) 透视投影模型; (b) 平行投影模型
Fig. 3 Imaging models. (a) Perspective projection model; (b) parallel projection model

表 2 光学显微视觉配置与成像模型

Table 2 Optical micro-vision configuration and imaging models

Optical configuration	Projection model	
Conventional lens	Large depth of field	Perspective projection
	Small depth of field	Parallel projection
Telecentric lens	Parallel projection	
Confocal	Perspective projection	

$$\lambda \begin{bmatrix} u \\ v \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f_u & s & u_0 \\ 0 & f_v & v_0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} [\mathbf{R} \quad \mathbf{T}] \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \\ 1 \end{bmatrix} = \mathbf{K} [\mathbf{R} \quad \mathbf{T}] \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \\ 1 \end{bmatrix}, \quad (6)$$

式中: λ 为非零尺度因子; \mathbf{K} 为相机内参; (\mathbf{R}, \mathbf{T}) 为相机

外参,分别表示旋转矩阵和平移向量; s 为倾斜因子,一般不予考虑。同时,光学镜头存在畸变影响,畸变分为

径向畸变与切向畸变,可描述为

$$\begin{cases} x_d = x(1 + k_1 r^2 + k_2 r^4 + k_3 r^6) + [2p_1 xy + p_2(r^2 + 2x^2)] \\ y_d = y(1 + k_1 r^2 + k_2 r^4 + k_3 r^6) + [2p_2 xy + p_1(r^2 + 2y^2)] \end{cases} \quad (7)$$

式中: (x, y) 为点在像面坐标系下的实际二维坐标; (x_d, y_d) 为像面坐标系下校正畸变后的理想坐标; (k_1, k_2, k_3) 为径向畸变系数; (p_1, p_2) 为切向畸变系数。

透视投影模型适用于放大倍数较小的传统透镜。但在微观领域,微小的特征和受限的视野仍然给标定增大了难度。在早期,Martins等^[28]采用双平面的方法进行显微针孔相机的标定。Zhou等^[29]采用点阵列图案进行标定,其图案的制作精度与标定算法的鲁棒性都对标定结果造成了影响。随着分辨率板的出现,Li等^[30]运用美国Thorlabs公司的USAF 1951分辨率板进行显微相机的标定。他们利用单张图像中高精度鲁棒性线特征提取来求解单应性矩阵,在简化模型的情况下获取相机内参与外参。该团队通过提取R1L1S1N分辨率板上的单网格特征实现了对显微相机全参数的标定,重投影误差达到亚像素^[31]。另外,基于虚拟图案的自主标定法在文献^[32]中提出并应用于微观机器人的视觉校正领域。

2.2.2 平行投影模型

远心镜头因具备畸变小、放大倍率固定且成像质量高等优势而广泛应用于工业精密定位测量中。其分为物方远心镜头、像方远心镜头和双远心镜头。双远心镜头兼顾物方和像方远心镜头的优点,镜头在物体和图像空间中都具有远心性,其中,孔径光阑放置在光学系统焦平面,使得主光线平行于光轴且光线会聚中心位于无穷远处,因此模型属于平行投影模型。如图3(b)所示,三维世界坐标系中的点 $P(X, Y, Z)$ 投影到图像像素坐标系中的点 $p(u, v)$ 满足的关系为

$$\begin{bmatrix} u \\ v \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} s_x & 0 & 0 & u_0 \\ 0 & s_y & 0 & v_0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{R} & \mathbf{T} \\ 1 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \\ 1 \end{bmatrix}, \quad (8)$$

式中: (s_x, s_y) 代表水平方向与垂直方向单位长度像素数量。由于平行投影中深度轴 Z 轴被忽略,对于平移向量 \mathbf{T} 而言只在 X 和 Y 两个方向有效。在显微视觉系统中,显微镜物镜的放大倍数 M 也是一个需要校准的参数。由于像素单元的物理边长 d_x 和 d_y 、两个方向上的放大倍数由 $M_x = S_x \cdot d_x$ 和 $M_y = S_y \cdot d_y$ 定义,总放大倍数计算为 $M = (M_x + M_y) / 2$ 。在平行投影模型中,没有考虑深度信息,畸变仍然存在。由于此类显微视觉系统景深小,受限的景深给平行投影的标定带来了困扰。针对显微视觉平行投影的标定方法很少的问

题,Chen等^[33]给出了一种双目远心镜头标定方法,通过圆形标定板实现了远心镜头双目标定且标定结果能达亚像素。

3 基于光学显微视觉的精密定位测量算法分类

显微视觉精密定位测量算法旨在根据至少两张图像确定目标运动参数。若两张图像为运动前后的序列图像,则求解的位移为相对位移;若两张图像为目标图像与模板图像,则获取的位移为绝对式位移。精密定位测量算法众多,包括特征匹配、模板匹配、相位相关、光流法等。根据目标成像与算法原理,这些方法应用于不同的场景中。同时根据拍摄对象,定位测量算法可分为基于特定图案的显微视觉精密定位方法和无特定图案的显微视觉精密定位方法。

3.1 基于特定图案的显微视觉精密定位方法

由于特征图案的规律性与可控性,绝大多数定位测量算法采用基于特殊图案的方式进行。它们通过刻蚀、超精密加工或是3D打印等技术加工出高精度的微形貌表面,并将得到的图案作为标靶附着于被测对象上来实现高精度的多自由度定位测量。

3.1.1 基于周期图案的精密定位方法

周期性图案主要指等间距分布的条纹、格线、圆、矩形等图案,每个基本图案在制造时都尽量保证外观尺寸相同,以保证定位测量精度,对此类的测量方法往往属于增量式且只能进行相位位移的测量。表3给出了基于周期图案的测量方法对比。

3.1.1.1 基于周期条纹图案的精密定位方法

周期条纹图案是最简单的测量图案之一,类似于尺子上的刻度线。卢清华等^[34]提出了一种将梯度运动估计与鲁棒运动估计结合的图像金字塔多尺度显微运动测量方法,提升了测量精度和计算速度。显微视觉系统测量条纹间隔为 $10 \mu\text{m}$ 的石英标定块时,在 $2 \mu\text{m}$ 的行程下,最大测量偏差为 12.5 nm 。然而,此方法仅适用测量小行程的微运动,且不能测量旋转角度。

Clark等^[35]利用搭载同轴光源的显微视觉系统和具有 $10 \mu\text{m}$ 间距的条纹刻度图案,如图4所示,通过精密中心线提取算法和多次滤波处理,实现了分辨率为 $0.04 \mu\text{m}$ 的直线位移测量;同时,利用转动时旋转半径远大于末端点位移时的直线距离与弧长的近似关系,实现了在 7.46 mrad 行程内分辨率为 $0.29 \mu\text{rad}$ 的旋转

表 3 基于周期图案的测量方法与性能

Table 3 Periodic-pattern-based measurement methods and their performance

Pattern	Method	Preparation	Degrees of freedom	Precision	Range	Resolution	Efficiency
Stripe pattern	Image pyramid ^[34]	Quartz	1(x)	12.5 nm	2 μm	-	-
	Edge detection ^[35]	-	2(x, θ)	-	7.46 mrad	0.04 μm , 0.29 μrad	-
	Wavelet transform ^[36]	-	2(x, y)	10 nm	-	-	-
	Delayed Moiré fringes ^[37]	Print	2(x, y)	-	-	0.036 mm	15 Hz
Array pattern	Monocular 3D reconstruction ^[38]	-	3(α, β, θ)	1"	2 π rad	-	-
	Discrete Fourier analysis ^[39]	Etch mask	3(x, y, θ)	$<10^{-2}$ pixel	-	<10 nm	-
	Discrete Fourier analysis ^[18]	Iphone 4s screen	3(x, y, θ)	-	-	3.5 nm (x) 8 nm (y) 4 μrad (θ)	-
	Sampling Moiré ^[40]	Printed tape	1(x)	<4 μm	-	-	-
Grid pattern	Center point extraction ^[41]	Glass grille	3(x, y, θ)	7 μm	220 mm	-	4 Hz
Checkerboard	Monocular PnP ^[42]	-	4(x, y, z, θ)	<1 μm	<50 μm (x, y) <20 μm (z) 360° (θ)	-	>10 Hz

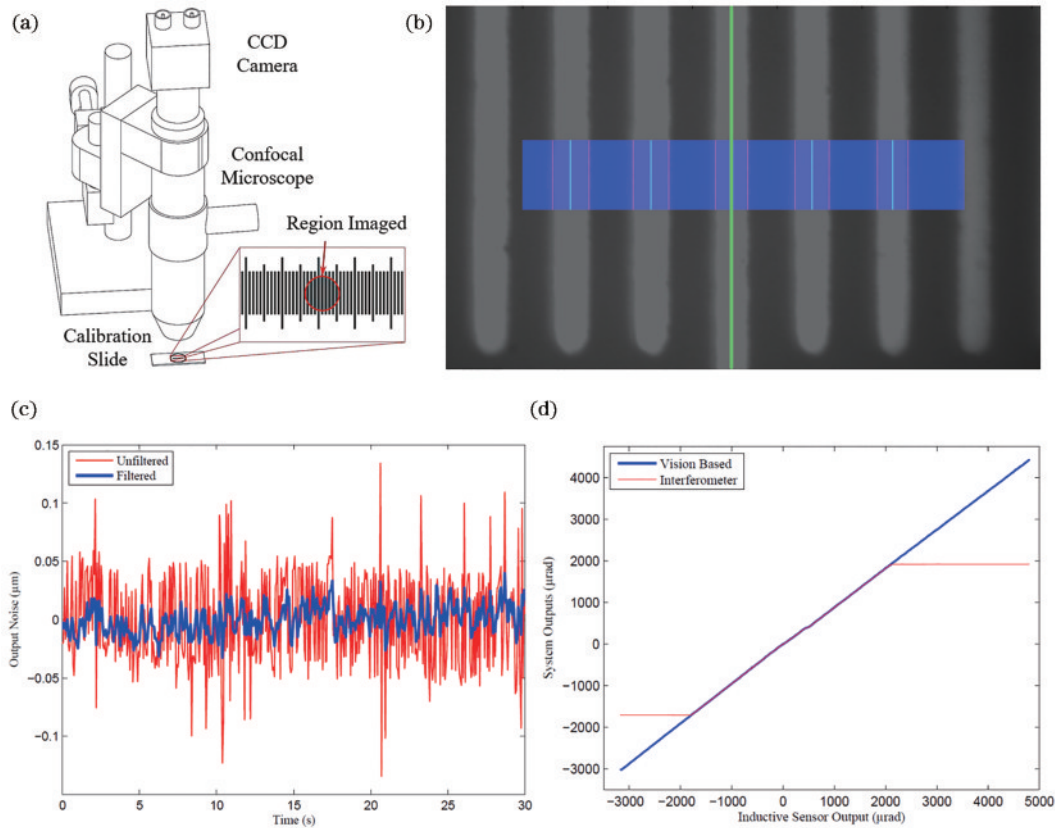


图 4 基于周期条纹图案的定位方法^[35]。(a) 测量系统组成；(b) 条纹中心线提取；(c) 噪声滤波处理结果；(d) 角度测量验证
Fig. 4 Positioning method based on periodic fringe pattern^[35]. (a) Composition of the measurement system; (b) centerline extraction of stripes; (c) processing result of noise filtering; (d) verification of angle measurement

角度测量。但该方法通过精确求解相邻两帧间的条纹中心线距离变化来测量位置，一旦速度过高就会造成相邻帧的图案位置变化不连续，只适用于低速度测量。Sandoz 等^[36]没有采用基于像素域的图像处理方法，而是采用基于频域处理和相位计算的方法，利用相机拍

摄一对相互正交的周期性正弦条纹图案，利用小波变换获取图像相位分布，从而在 10 μm 偏移量和 5 \times 放大倍率下实现了约 10 nm 的横向位置精度。该方法依靠图案本身精密的尺寸信息进行自校准，不需要额外的校准措施。

两层透射式等周期条纹图案重叠相对移动产生莫尔条纹信号,该条纹信号通过相位值传递并放大位移,是透射式光栅尺的关键原理。但透射式光栅中的扫描光栅需要同光电传感器一起运动,限制了莫尔条纹位移测量方法在视觉非接触式测量中的应用。为了克服需要扫描光栅跟随运动的不足,Saveljev等^[37]提出了一种基于延迟莫尔条纹的视觉测量机械振动和位移的方法。该方法关键之处在于相机只拍摄一层与运动物体固定的周期条纹参考图案,其莫尔条纹的产生没有使用与相机固定的扫描光栅,而是在计算机中将相机拍摄得到的图形信号与计算机生成的虚拟条纹信号相叠加。在拍摄时计算机实时处理这两种信号,同样能做到实时测量。基于该原理,进行了桥梁振动测量实验,其标靶图案的大小和条纹的周期取决于距离,对于2~25 m范围内的距离,最小测量位移为0.036~0.17 mm。该方法如果能够减小图案大小和提升图案的制造精度,则在精密测量方面具有一定潜力。

3.1.1.2 基于周期阵列图案的精密定位方法

周期阵列图案主要有圆阵列和矩形阵列,相比条纹图案方法,阵列图案方法一般具有自校正、易测角度、多自由度测量的优点。在旋转角度测量方面,Li等^[43]利用单台相机拍摄光刻的圆孔阵列图案来实现系统像素大小的测量和畸变的自校准。实验验证了其在0~2 π 整圆范围下的旋转角度测量能力,测量误差小于3"。同时,该方法CCD传感器和透镜的光轴不需要严格垂直。Jin等^[38]基于单目三维重建矩阵标定方法,进一步改进了圆孔阵列方法的测量能力和测量精度,使其能测量空间的3个旋转角度。通过计算仿真验证了该方法的转角测量精度可以达1",并且进行了相机在不同安装位置的旋转角度测量实验,相机光轴与图案标靶平面垂直安装时和倾斜安装时的角度测量差值小于1",验证了光轴和标靶平面不垂直时测量的准确性。与其他方法进行了对比实验,验证了其测量

精度优于直线图案角度测量法^[44]和Li等^[43]提出的圆孔阵列方法。

Sandoz等^[39]为了改善频域处理周期条纹方法^[36]中一对图像中左右两幅子图间距较远,导致拟合得到的中线在被延长求取交点时产生较大的累计误差的问题,设计了具有等间隔的矩形阵列图案的蚀刻掩模板,采用离散傅里叶变换的方式获取图像频谱图,通过选取合适的带通滤波器进行频率域滤波,实现对正弦信号的分解。通过两组正弦信号中线交点位置的变化计算偏移量,实现了三自由度精密测量(x, y, θ)。该方法在8倍物镜和10 μm 的矩形间距情况下,测量分辨率为纳米级,在同一位置的标准偏差低于 10^{-2} 像素。Chen等^[42]使用单个相机捕捉2D周期性图案的图像,然后使用2D离散傅里叶变换(2D DFT)方法估计其基频分量的相位。为了提高精度,分析了二维DFT的相位估计误差,提出了一种相位估计方法。有趣的是,其实验环节没有用光刻的标靶,而是用手机屏幕的像素点作为周期性矩形测量图案,实验结果表明该方法的峰间位移分辨率在X轴为3.5 nm,在Y轴为8 nm;绕Z轴旋转角度分辨率为4 μrad 。

同样,为了在不使用扫描光栅的前提下产生莫尔条纹信号,Morimoto等^[45]提出了一种基于周期性矩形图案的采样莫尔方法,该方法原理如图5(a)所示。首先通过相机拍摄周期性矩形图案获得数字图像,再通过稀疏像素方法,即以恒定的像素间距对相机获得的图像进行采样,然后进行线性插值提升分辨率,这样就得到了采样莫尔条纹图案,最后分析每帧图像莫尔条纹的相位变化便能求得位移。该研究利用数码相机从1 m和40 m距离拍摄间距为5 mm的周期矩形光栅图案,平台在 x 方向上移动1000 μm 行程时,1 m和40 m处测量的位移误差分别为1 μm 和6 μm 。Ri等^[40]将该周期矩形图案高质量印刷在定制的塑料胶带上,如图5(b)所示,实现了基于视觉采样莫尔原理测量试件

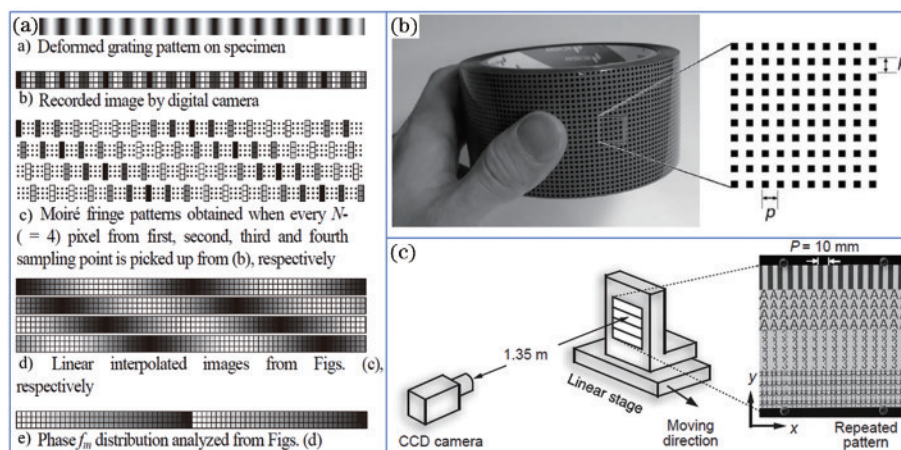


图5 采样莫尔测量方法。(a) 采样莫尔法原理^[45]; (b) 试件变形测量胶带^[40]; (c) 利用任意周期阵列图案的定位测量法^[46]

Fig. 5 Sampling Moire measurement method. (a) Sampling Moire method principle^[45]; (b) specimen deformation measurement tape^[40]; (c) positioning measurement method using arbitrary periodic array pattern^[46]

变形分布的材料力学实验方法。其图案间距为 2 mm 时,位移测量的平均误差小于 $4 \mu\text{m}$,相当于间距精度的 1/500。基于采样莫尔原理,Ri 等^[46]又提出了利用任意重复图案如字母、文字、数字的位移测量方法,如图 5(c)所示。该方法的关键是使用了位移前后莫尔条纹的基频和高阶频率分量的相位信息,精度可以达到图案间距的 1/1000。由于莫尔信号的放大作用,采样莫尔方法优点之一是测量分辨率较低。Sugiura 等^[47]将采样莫尔方法用于显微运动测量,设计了基于光刻矩阵图案的显微测量系统,将测量分辨率从传统视觉方法的 500 nm 提升至 65 nm,并且成功地将该系统用于细胞的反作用力与变形量的测量^[46]。基于采样莫尔原理的测量方法在材料应力测量、变形测量、裂纹预测、振动测量等方面展现了极大的潜力^[48],其缺点是需要确保矩形阵列图案的周期和 CCD 像素之间具有某些精确的整数比^[37]。

3.1.1.3 基于格线图案的精密定位方法

格线图案一般由等间隔的纵横垂直相交的条纹组成。Ibaraki 等^[41]首次将显微视觉方法用于机床设备的轨迹测量,利用亚像素精度的边缘轮廓识别算法捕捉网格线的交点位置(交点坐标提取校准),求得图像中心点与网格交点的偏移,从而实现位移和旋转三自由度测量。但由于镜头存在较大畸变,圆轨迹整体偏差

为 $7 \mu\text{m}$,且该算法的处理速度仅为 4 frame/s,还需进一步提高处理速度。Iriino 等^[49]通过使用三目视觉测量系统,进一步提高了测量精度。该系统中,3 台摄像机以 80 mm 的间距排列成 L 形,通过这种扩展,角度偏差精度提高了约 80 倍。同时,通过测量短时间内的热变形,他们利用热变形量与线性膨胀系数的关系间接测量了温度变化。基于傅里叶变换的测量方法也能用于格线图案,Yamahata 等^[50]利用离散傅里叶变换相移计算方法,实现了优于 1/100 像素尺寸的测量分辨率。

3.1.1.4 基于棋盘格图案的精密定位方法

棋盘格由一系列黑白相间的方格组成,由于易于从中精确提取角点,是目前使用最广泛的相机标定图案。利用 perspective-n-point (PnP) 算法处理相机拍摄的棋盘格图案,便能直接估算出相机相对棋盘格平面的位姿。苏建东等^[51]为了改善棋盘格板的安装偏差影响精度的问题,提出了一种在测量前采集受限运动图像信息的安装角度偏差计算方法,使棋盘板安装不用由人工进行校准。Lu 等^[52]基于 PnP 原理,将视觉系统安装在五轴平台获取姿态信息,如图 6(a)所示,该系统的平均定位误差小于 $5 \mu\text{m}$,实现了五轴平台旋转轴位置无关几何误差 (PIGEs) 和位置相关几何误差 (PDGEs) 的非接触测量^[53]。通过方程迭代的方法,得到平台误差模型的几何结构参数,并对 PIGE 进行了

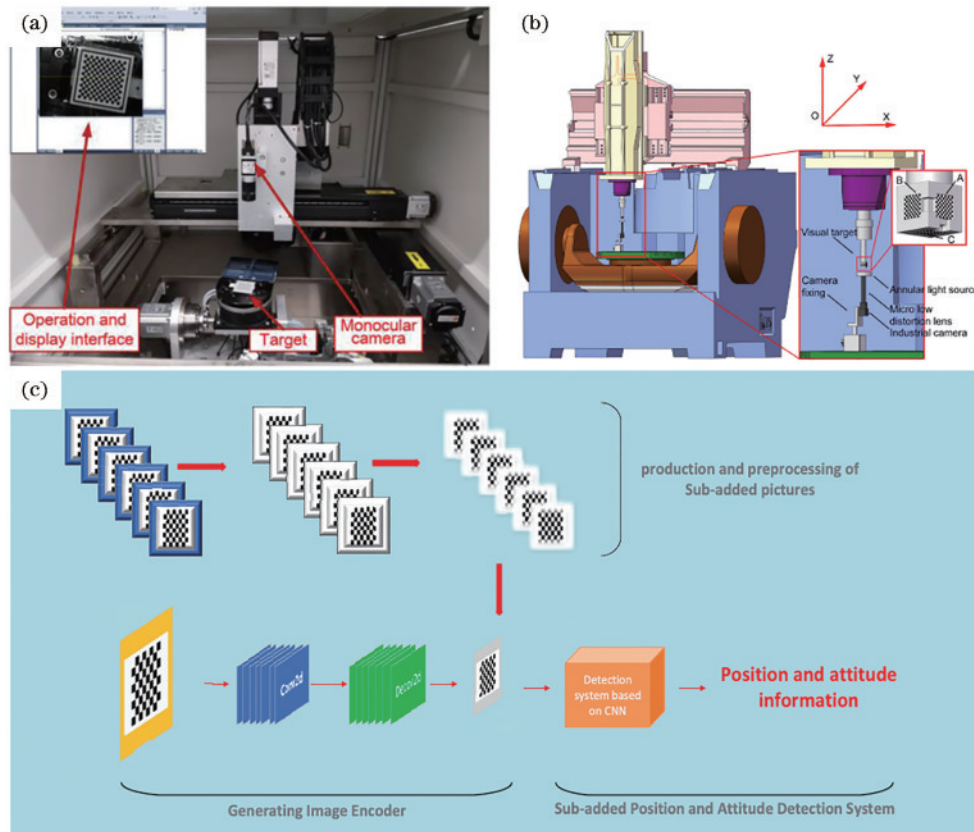


图 6 基于棋盘格图案的精密定位方法。(a) 五轴平台测量^[52]; (b) 显微视觉五轴机床校准^[42]; (c) 基于卷积神经网络的六自由度测量^[54]
Fig. 6 Precision positioning methods based on checkerboard pattern. (a) Five-axis platform measurement^[52]; (b) five-axis machine tool calibration based on micro-vision^[42]; (c) six degrees of freedom measurement based on convolutional neural networks^[54]

校准,将五轴运动平台的平均位置误差从 108.70 μm 降低到 22.33 μm ,角度误差平均值从 0.265° 降低到 0.0357°。然而,由于棋盘标靶较大,为了获取完整的图案,该方法采用的相机放大倍率过低,这使测量分辨率受到限制。Chen 等^[42]采用微距放大视觉系统提升了测量分辨率和精度,实现了小于 1 μm 的测量精度,并能测量任意旋转角度,该方法可以用于对五轴机床的校准,如图 6(b)所示。Yang 等^[54]从理论上分析了位置和姿态变化过程中维度之间的棋盘格图案的视觉对应关系,证明了每个维度变化的视觉独立性,如图 6(c)所示。他们首次将卷积神经网络应用于六自由度连续精确测量,通过实验验证了基于神经网络的位姿测量方法的有效性。总的来说,基于棋盘格的方法能够快速测量六自由度参数,但由于需要让完整的棋

盘格图案位于视场范围内,其位移测量行程往往较小。

3.1.2 基于伪周期图案的精密定位方法

所谓伪周期图案,就是在周期图案中融入的独特的编码序列,如 QR 二维码^[55]、环形移位码^[56]、M 序列码^[57]等,每一个编码图像在所有图像中都是唯一的,即使连续两帧之间没有重叠区域算法也能实现图像定位,测量方式从增量式转变为绝对式。所以基于伪周期图案的定位测量方法相比基于周期图案的方法具有运动速度快、数据不易丢失、累积误差小、稳定性好等优点。图案标靶的制造精度往往决定了此类方法的测量精度,所以基于编码的视觉定位方法所需的标靶需要得到精密制造,如掩模制造^[58]、光刻^[59]或者进行精确标定^[56]。表 4 给出了基于伪周期图案的测量方法的对比。

表 4 基于伪周期图案的测量方法与性能
Table 4 Pseudo-periodic pattern-based measurement methods and their performance

Pattern	Method	Preparation	Degrees of freedom	Precision	Range	Resolution	Efficiency
1D coding pattern	Manchester encoding + periodic grating stripes ^[60]	-	1(x/θ)	-	100 mm	<1 nm	300 Hz (CPU) 1 MHz (DSP)
	M-sequence pseudo-random coding ^[57]	Mask	1(x)	0.79 μm	1310.72 mm	-	0.3 m/s
	Binary phase encoding ^[61]	Quartz mask	1(θ)	0.1"	360°	0.044° (13 bits)	500 Hz
2D coding pattern	Interleaved trellis coding + Fourier analysis ^[59]	Photolithography	3(x, y, θ)	18.5 nm	221.33 μm	0.5 nm	30 Hz
	Missing rectangle encoding + Fourier analysis ^[58, 62-63]	Mask	6	1 nm (x, y) 4 μrad (θ)	110 mm (x, y) 10 mm (z)	<1 nm (x, y) <0.1 mm (z) <1 μrad (θ), <100 μrad (α, β)	30 Hz (512 pixel \times 512 pixel)
	Recognition of missing rectangular encoding feature points ^[64]	Flat panel display	6	15 μm 0.05°	-	-	-
	Shift cyclic ring coding ^[56, 65-66]	Photolithography	6	1.6 μm (x, y) 1.4 μm (z) 0.0132°	230 mm (x, y)	-	7 m/min
	M-sequence coding + checkerboard pattern ^[67]	Photolithography	2	1 μm	80 mm (x, y)	-	-

3.1.2.1 一维编码定位测量方法

根据编码维数分类,基于伪周期图案的精密定位方法可以分为一维编码定位方法和二维编码定位方法。一维编码定位方法一般采用条纹编码图案,由于对视场大小要求不高,往往较低分辨率相机就能满足使用要求,这样降低了单帧图像大小并增加了传输速度;并且,由于只需要测量单个自由度,其计算量相对较少。因此,一维编码定位测量方法一般能实现高速

实时测量。

Masa 等^[60]设计了一种周期条纹位于下方、12 位曼彻斯特编码位于上方的测量图案。如图 7(a)所示,文献[60]中的方法在没有使用光学镜头,只用小型 USB 相机、玻璃尺和 LED 光源的前提下,利用正余弦投影点云重心测量法,实现了小于像素尺寸 1/1000 的纳米级测量分辨率。基于该原理,Masa 等开发了小型直线编码器、旋转编码器、二维编码器。Wang 等^[57]利

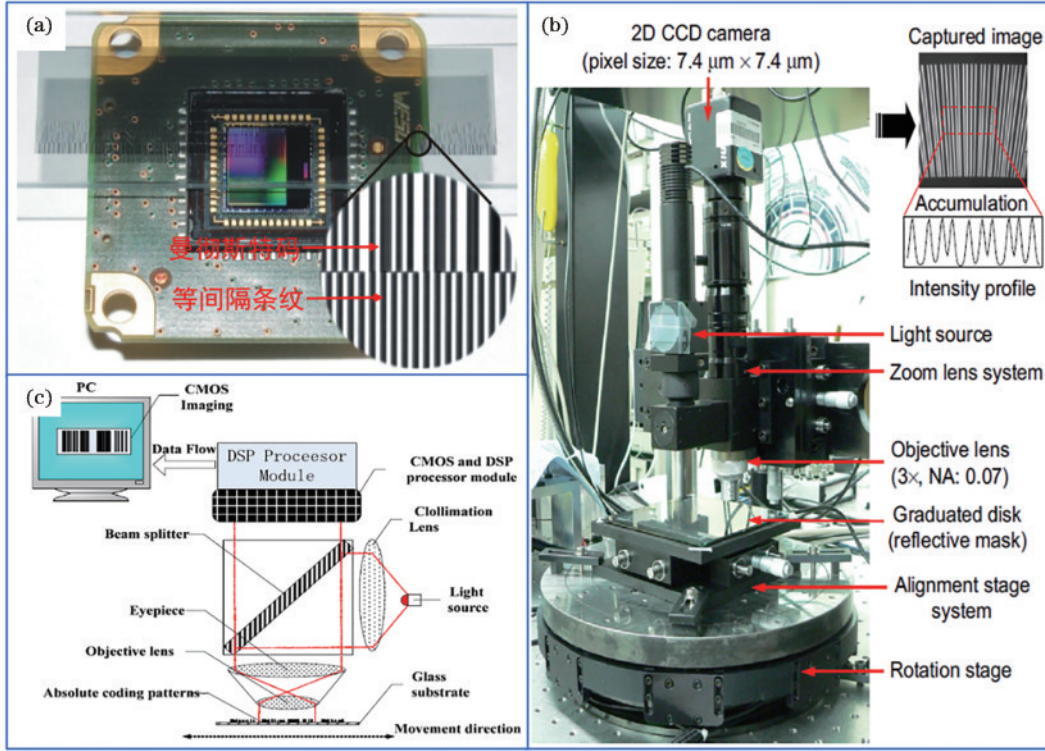


图 7 基于条纹编码图案的定位测量方法。(a) 基于曼彻斯特码的测量方法^[60]；(b) 基于二进制相位编码的测量方法^[61]；(c) 基于 M 序列伪随机编码的测量方法^[57]

Fig. 7 Positioning measurement methods based on stripe coding pattern. (a) Measurement method based on the Manchester code^[60]; (b) measurement method based on binary phase coding^[61]; (c) measurement method based on M-sequence pseudo random coding^[57]

用光掩模制造工艺制造了 M 序列伪随机编码,通过二维高斯滤波、精确边缘提取、阈值分割、位置解码等一系列处理算法,实验验证方法的测量精度为 $0.79 \mu\text{m}$, 优于光栅尺方法。此外,如图 7(c)所示,该方法采用数字图像信号处理芯片(DSP)集成系统直接进行实时计算,最大测量速度达 0.3 m/s ,最大测量加速度达 30 m/s^2 ,具有广阔的工业现场使用前景。Kim 等^[61]提出了一种二进制相位编码分度盘方法来测量旋转角度,如图 7(b)所示,对 10 位和 13 位编码图案实现的分辨率分别为 0.352° 和 0.044° ,计算速度能达到 500 Hz 。

3.1.2.2 二维编码定位测量方法

一般而言,二维编码定位测量方法相比一维编码定位测量方法计算速度较慢,但由于同时能获得多个点的位置信息,此类方法具有三自由度甚至六自由度测量能力,能大大简化安装结构和测量流程,因此二维编码定位测量方法也受到了国内外学者的关注。其中的编码图案对测量精度、分辨率、计算速度等有较大影响,因此不同的二维定位编码图案也被提出,如图 8 所示。此类编码方法通常采用傅里叶变换轮廓术来进行平面旋转角的测量。二维离散傅里叶变换(DFT)用于处理图像,表达式为

$$F(u, v) = \sum_{x=0}^{M-1} \sum_{y=0}^{N-1} f(x, y) e^{-j2\pi(ux/M + vy/N)}, \quad (9)$$

式中: M 和 N 为图像尺寸; $f(x, y)$ 为空间域坐标系中的像素强度。对图像进行傅里叶变换后,通过相位展开得到相平面,最后,拟合相平面以获得旋转角度,表达式为

$$\begin{cases} \phi(i, j) = Ai + Bj + C \\ \theta = \arctan(B/A) \end{cases}, \quad (10)$$

式中: $\phi(i, j)$ 为像素点 (i, j) 的相位; θ 为旋转角。

Sandoz 团队^[68]为了扩大之前提出的基于离散傅里叶变换和相位求解的测量方法^[39]的量程,提出了一种缺失圆孔的伪周期编码图案,如图 8(a)所示,使用长度为 N 的移位寄存器对 2^N 个位置序列进行编码,每一行编码间用一组参考线进行分隔,并建立查找表(LUT)实现编码值与二维位置的对应。通过解码,获得视野图像在全局图像中的绝对粗位置。采用傅里叶变化轮廓法进行相平面的计算,包括对图像的离散傅里叶变换、带通滤波器频率域滤波、相位展开等方法,获取目标平面三自由度精确位姿。该方法的测量分辨率优于 10^{-2} 像素尺寸, X 和 Y 方向上的峰谷偏差分别为 21.4 nm 和 14.5 nm ,旋转角度偏差为 0.0019° 。此外,该团队还发现该方法具有较强的鲁棒性,在有阴影或低亮度的条件下,该方法能正确识别编码。通过在培养皿下印刷该编码图案,实现了在显微镜操作观察

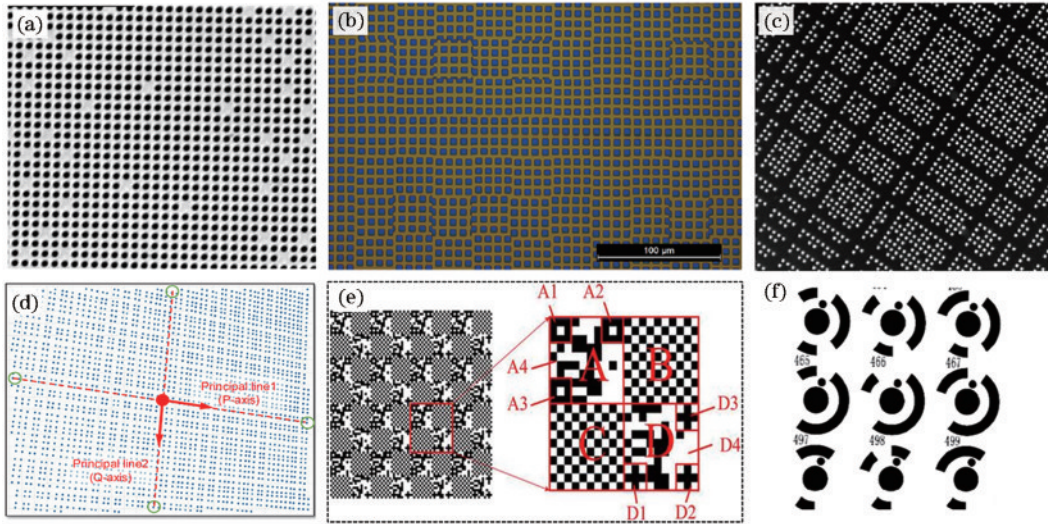


图 8 用于视觉定位测量的二维编码图案。(a) 缺失圆孔的伪周期编码^[68]; (b) 交织网格状的编码^[59]; (c) André 团队的缺失矩形编码^[58, 62-63]; (d) Kim 团队的缺失矩形编码^[64]; (e) M 序列码与棋盘格结合的编码^[67]; (f) 移位循环环形编码^[56]

Fig. 8 Two-dimensional coding pattern for visual localization measurement. (a) Pseudo-periodic coding with missing round holes^[68]; (b) interwoven grid-like coding^[59]; (c) missing rectangular coding by André's team^[58, 62-63]; (d) missing rectangular encoding by Kim's team^[64]; (e) encoding combined with M-sequence code and checkerboard grid^[67]; (f) shifted circular encoding^[56]

样本时的重复定位的应用。Tan 等^[69]通过基于相位测量的线性插值提高了方法的测量精度,并将提出的方法用于微运动平台的校准,使方形轨迹跟踪的定位精度从 $22\ \mu\text{m}$ 提高到 $3.5\ \mu\text{m}$,随机点定位精度从 $22\ \mu\text{m}$ 提高到 $7\ \mu\text{m}$,实验验证该方法的重复度优于 $10\ \text{nm}$ 。Guelpa 等^[59]设计了一种交织网格状的编码图案,提出的方法基于二维双尺度原理利用周期网格的直接相位测量位移。在 $0\sim 221\ \mu\text{m}$ 的运动范围下,以电容传感器为参考,观察到了其亚纳米分辨率 ($0.5\ \text{nm}$)、良好的线性度 (0.16%)、重复度 ($13.5\ \text{nm}$) 和精度 ($18.5\ \text{nm}$)。为了使该类方法具有更大的量程分辨率比值,André 等^[62]提出了一种不引入非线性的保相位编码方式,基于该编码方式设计了新的图案,如图 8(c) 所示,测量原理同样是基于傅里叶变换、高斯滤波、包覆相位求解等的算法。利用搭载有 $0.01\ \text{nm}$ 分辨率传感器的超精密压电平台进行了验证实验,结果表明该视觉测量方法在 $11\ \text{cm}\times 11\ \text{cm}$ 的测量范围内能够实现低于 $1\ \text{nm}$ 的横向测量精度、低于 $4\ \mu\text{rad}$ 的角度测量精度,量程/分辨率超过 10^8 。同时,实验验证了该方法能在散焦、局部对比度差异、照明不均匀或遮挡的情况下保持可靠的测量^[58]。从该图案的傅里叶分析中进一步推导出了六自由度测量方法^[63],通过实验验证了其位姿测量能力,平移的实验分辨率低于像素的 $1/1000$,平面内旋转测量分辨率低于 $1\ \mu\text{rad}$,离轴旋转分辨率低于 $100\ \mu\text{rad}$ 。并且进行了所提傅里叶分析测量方法与 PnP 方法的对比实验,实验表明所提方法的离轴角度分辨率为 $10^{-7}\ \text{rad}$,低于 PnP 方法的角度分辨率 $10^{-3}\ \text{rad}$ 。自此,Sandoz 团队基于缺失矩形编码和傅里叶分析构建了完整的六自由度显微视觉精密运动测量方法,该类方法的优点是分辨

率高、精度高、鲁棒性强,不足之处为计算时间较长。

Kim 等^[64]也使用类似基于线性反馈移位寄存器 (LFSR) 缺失矩形编码的图案,但没有采用傅里叶分析方法,而是利用标定矩阵以及图案中目标点绝对位置与图像间的对应关系,求解六自由度位姿。利用平板显示器作为图案标靶进行测试,方法的位置和角度最大偏差小于 $\pm 15\ \mu\text{m}$ 和 $\pm 0.05^\circ$ 。Li 等^[65]采用移位循环环形编码图案,通过减小视场范围,提高帧率,采用频闪背光照明方法,实现了对机床二维轮廓的动态测量 (进给速度为 $7000\ \text{mm}/\text{min}$),平均测量精度为 $4.6\ \mu\text{m}$ 。为了降低畸变对测量精度的影响,该团队提出了一种分区域畸变标定方法。为了扩展测量能力,利用类似的环形图案,该团队分别采用基于双目多点三维点重建的方法^[66]和单目 PnP 方法^[56]实现了大范围三维测量。双目方法因为须精确调整两相机间的角度所以安装不便;而单目方法成本更低,安装较方便,通过五轴机床安装实验验证了其 X/Y 位移和 Z 位移平均测量精度分别为 $1.6\ \mu\text{m}$ 和 $1.4\ \mu\text{m}$, A 轴平均角度测量精度为 0.0132° 。Zhao 等^[67]为了提高测量精度,提出了一种 M 序列二进制编码与棋盘格图案融合的测量图案,其中的棋盘格图案作为周期图形起着细分的作用,该方法的平均测量偏差小于 $\pm 1\ \mu\text{m}$,重复性误差小于 $\pm 0.1\ \mu\text{m}$ 。但该方法需要调整远心距离镜头的放大率来让编码图案的像素宽度是 CCD 相机像素大小的整数倍,增加了安装调整时间。

3.1.3 基于非周期图案的精密定位方法

非周期图案一般指无规则且各向异性的图案,如散斑图等。此类图案往往具有丰富的特征信息,因此很少在频率域对这类图像进行分析。而由于此类图案

具有特征多、子图差异大等特征,数字图像相关算法、模板匹配法及特征匹配方法通常被学者改进并应用于

定位测量中。表 5 展示了基于非周期微结构的定位测量算法的对比。

表 5 基于非周期图案的测量方法与性能

Table 5 Nonperiodic pattern-based measurement methods and their performance

Pattern	Method	Preparation	Degrees of freedom	Precision	Range	Resolution
Speckle pattern	Spatial gradient ^[70]	Computer simulation	2	0.005 pixel	Low	Low
	Newton-Raphson ^[71]	Spraying	3	500 μm	Low	Low
	Pro-A ^[72]	Surface texture	3	400 nm	Low	High
	CIR ^[73]	Surface projection	2	1 nm	Low	High
Microstructure pattern	Template matching ^[74]	Ultraprecision machining	2	100 nm	Large	Low
	Pattern recognition ^[75]	Ultraprecision machining	2	90 nm	Large	High
	Neural network ^[76]	Ultraprecision machining	2	50 nm	Large	High
	PMFE ^[77]	Ultraprecision machining	2	600 nm	Large	High

3.1.3.1 散斑图定位测量算法

关于散斑图的综述已经比较完备^[78],因此在本综述中只作简单介绍。一般来说,任何灰度值随机分布的图案都可以看作是散斑图。典型的散斑图包括被观测物体表面自然形成的纹理^[79]、人工喷涂黑白漆或计算机生成的合成散斑图^[80]、光在物体表面投影或干涉形成的散斑图^[81],3 种典型散斑如图 9 所示。Yamaguchi^[82]、Peters 等^[83]、Bruck 等^[84]在 20 世纪 80 年代首次提出了数字图像/散斑相关方法,并将其应用在物体的变形和应变测量中。数字图像相关(DIC)方法通常以两幅图像间的零均值归一化相关性(ZNSSD)构建目标函数,该目标函数的表达式^[85]为

$$C_{\text{ObjFun}} = \sum_{i=1}^I \left\{ \frac{F[\mathbf{x}_0 + W(\Delta\mathbf{x}_i, \Delta\mathbf{P})] - \bar{f}}{\tilde{f}} - \frac{G[\mathbf{x}_0 + W(\Delta\mathbf{x}_i, \Delta\mathbf{P})] - \bar{g}}{\tilde{g}} \right\}^2, \quad (11)$$

式中: $F(\cdot)$ 为参考子区域图像像素函数; $G(\cdot)$ 为运动子区域图像像素函数; $W(\cdot)$ 为形函数且根据形变参数不同分为一阶、二阶和三阶; \mathbf{x}_0 为初始位置; $\Delta\mathbf{x}_i$ 和 $\Delta\mathbf{P}$ 分别为迭代过程中位置的变化和待求解形变参数的变化; \bar{f} 和 \bar{g} 为平均像素强度; \tilde{f} 和 \tilde{g} 为归一化像素强度。

对式(11)进行一阶泰勒展开,得到

$$C_{\text{ObjFun}} = \sum_{i=1}^I \left\{ \frac{F(\mathbf{x}_0 + \Delta\mathbf{x}_i) + \nabla f_i \frac{\partial W_i}{\partial \mathbf{P}} \Delta\mathbf{P} - \bar{f}}{\tilde{f}} - \frac{G[\mathbf{x}_0 + W(\Delta\mathbf{x}_i, \Delta\mathbf{P})] - \bar{g}}{\tilde{g}} \right\}^2. \quad (12)$$

将式(12)设置为 0 并对 $\Delta\mathbf{P}$ 求导,即可得到一阶最小二乘解:

$$\Delta\mathbf{P} = -\mathbf{H}^{-1} \sum_{i=1}^I \left(\nabla f_i \frac{\partial W_i}{\partial \mathbf{P}} \right)^T \times \left\{ f_i - \bar{f} - \frac{\tilde{f}}{\tilde{g}} \left\{ G[\mathbf{x}_0 + W(\Delta\mathbf{x}_i, \mathbf{P})] - \bar{g} \right\} \right\}, \quad (13)$$

式中: \mathbf{H} 为 Hessian 矩阵且 $\mathbf{H} = \sum_{i=1}^I \left[\left(\nabla f_i \frac{\partial W_i}{\partial \mathbf{P}} \right)^T \left(\nabla f_i \frac{\partial W_i}{\partial \mathbf{P}} \right) \right]$ 。

式(13)通常采用逆合成高斯牛顿法(IC-GN)得到迭代优化求解。Zhou 等^[70]在此基础上做出了改进并将其拓展到了精密定位测量领域。传统的算法通过牛顿迭代^[84]实现运动前后两幅图像相关系数的最大化,而该改进算法只须计算两幅图像的一阶导数,降低了计算复杂度。利用计算机生成的散斑图对该改进算法进行验证,并探究了图像噪声和散斑图中散斑的大小对测量精度的影响,结果表明,该方法的测量精度为 0.005 pixel,并且当散斑的大小为 2~5 pixel 时,测量

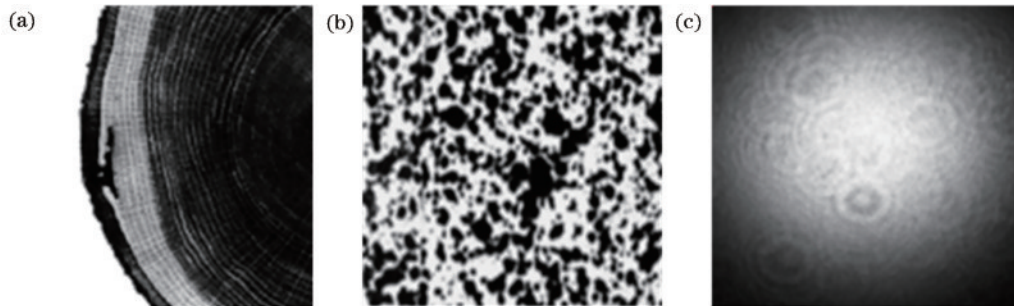


图 9 三种典型散斑图^[82]。(a) 表面纹理;(b) 合成散斑图;(c) 干涉散斑图

Fig. 9 Three typical speckle patterns^[82]. (a) Surface texture; (b) synthetic speckle pattern; (c) interference speckle pattern

精度最高。Zhang 等^[71]利用显微视觉系统采集并处理柔性微定位台表面的缺陷图案,实现了定位台位移和角度的精密测量,该方法首先利用改进圆投影模板匹配算法对运动前后的表面缺陷进行粗定位,再通过亚像素算法进行精定位,实验结果显示,该方法的位移测量误差不超过 400 nm,角度测量误差不超过 1°。同时,Li 等^[72]在模板匹配与数字图形相关算法基础上,开发了加速逆向优化搜索(AIOS)算法,提出了最优模板选择(OTC)策略和分段更新(PU)方案,并将它们与 IOS 方法相结合,实现了高精度、高帧率的模板匹配。Cheng 等^[73]结合白光干涉原理和图像配准算法实现了三轴超精密运动跟踪,该方法利用物体表面产生的干涉条纹对 Z 轴进行跟踪,通过物体表面的投影图案对 X 和 Y 轴进行跟踪,开发实时图像处理算法并将跟踪目标放置在配备干涉仪的显微镜下进行实验,实验结果显示,算法对跟踪目标在三个方向上的定位测量分辨率均小于 1 nm。

3.1.3.2 微结构表面定位测量算法

虽然散斑图在基于显微视觉的精密定位测量中得到了广泛的应用,但是其分辨率低,纹理杂乱无章,且无法用它进行绝对式定位测量。为了解决这些问题,Zhao 等^[74]利用超精密金刚石加工工艺^[86]在工件表面加工出了特定极性表面微观形貌^[87]并结合计算机视觉实现了全局绝对位置的精密定位,同时利用模板匹配算法和亚像素插值算法对工件表面任意位置进行定位测量,实验结果显示,该方法在 X 轴和 Y 轴方向的测量不确定度都达到了纳米级。Zhao 等^[75]继续在原方法上做出了改进,根据极性微观形貌的成像图案特点,在测量过程中引入了霍夫变换和神经分类器,从而将测量速度提高了 1000 倍,测量不确定度也提高到了 90 nm。特征提取与匹配是处理非周期图案常用的方

法。通常特征点提取分为 4 个步骤,包括图像金字塔构建、极值点坐标获取、特征点方向分配及描述子生成。提取特征点的方法包括尺度不变特征变换(SIFT)^[88]、加速鲁棒性特征(SURF)^[89]、oriented FAST and rotated BRIEF(ORB)算法^[90]、矩特征^[91]等。对特征点的匹配往往是计算两个描述子间的距离,这个距离可以是欧氏距离、余弦相似度或是汉明距离,它们的表达式如表 6 所示,其中 $b_i(\cdot)$ 为描述子的二进制值。

表 6 特征点匹配中距离的度量方法

Table 6 Measuring method of distance in feature point matching

Method	Expression
Euclidean distance	$d(F, G) = \sqrt{\sum (f_i - g_i)^2} (i = 1, 2, \dots, n)$
Cosine similarity	$\cos(F, G) = \frac{\sum (f_i \times g_i)}{\sqrt{\sum a_i^2} \times \sqrt{\sum b_i^2}} (i = 1, 2, \dots, n)$
Hamming distance	$h(F, G) = \sum b_i(F) \otimes b_i(G) (i = 1, 2, \dots, n)$

因此,基于极性表面微观形貌,Gao 等^[91]提出了多种精密定位测量方法。精密定位测量方法包括基于神经网络的方法、基于特征匹配的方法^[77, 92],其改进的特征匹配方法^[92]如图 10 所示。Li 等^[93]从光学成像原理和模板匹配算法的角度,研究了不同表面形貌经过光学成像后的像素强度分布规律并揭示了像素强度分布对定位测量分辨率的影响机理,在此基础上提出了一种能实现超分辨率测量的锚型表面微观形貌,如图 11(a)所示。该形貌经光学成像后的图案如图 11(b)所示。基于该图案,提出了一种结合亚像素插值和模板匹配的精密定位测量方法,实现了纳米尺度的光学定位测量。

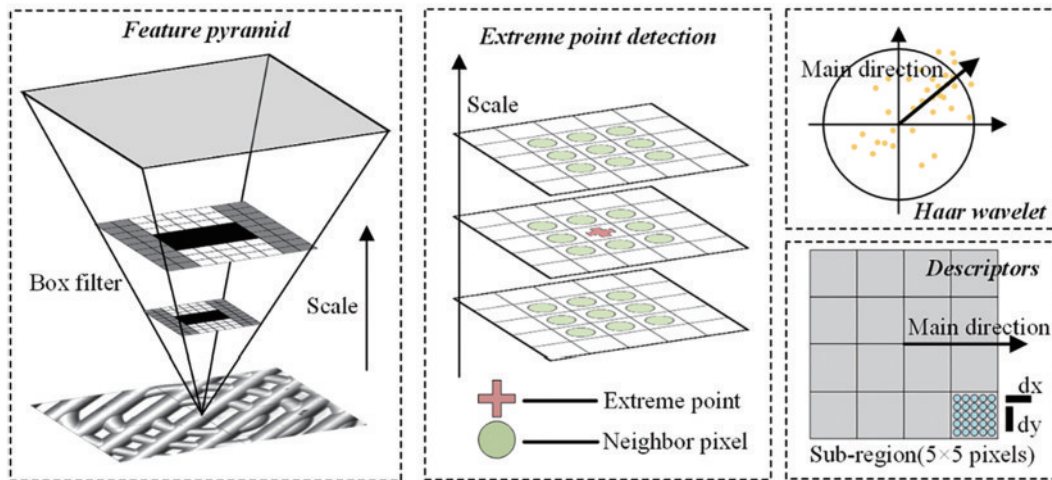


图 10 快速鲁棒性特征定位(FRFP)算法示意图^[92]

Fig. 10 Schematic of the fast and robust feature-based positioning (FRFP) method^[92]

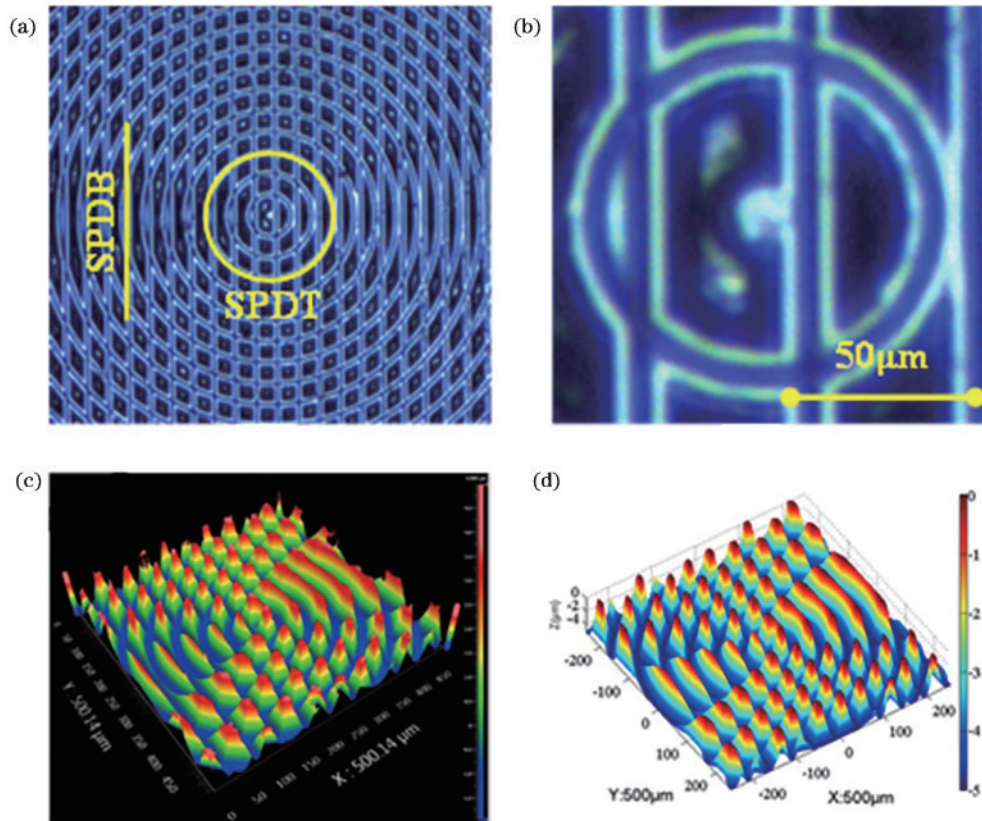


图 11 表面微观形貌光学显微图像^[77, 92]。(a) 普乐微结构表面实验结果;(b) 局部放大;(c) 普乐微结构表面形貌测量;(d) 仿真结果

Fig. 11 Optical microscopic image of the surface microstructure^[77, 92]. (a) Experimental result of the polar microstructure surface; (b) partial enlarged view; (c) surface topography measurement of the polar microstructure; (d) simulation result

3.2 无特定图案的显微视觉精密定位方法

由于没有使用特定图案作为标靶,显微视觉系统直接拍摄被测对象进行位置的求解,此类定位测量算法具备一定的局限性与专用性。同时,绝大多数无标靶的定位测量方法都用于电子显微镜中,如 PnP 方法^[94]、3D 运动跟踪方法^[95]等。而在光学显微视觉系统中,小景深和小视野范围导致此类方法只适用于特征体积小且形貌平缓的被测对象。此类方法针对特定形状的物体,集中于一些特殊的图像处理操作,如阈值分割、边缘提取、直线检测等。

如图 12 所示,生物学中细胞呈圆形且易于图像识别与提取,且操作探针呈细长状易于检测,因此针对细胞或是胚胎的微操作,通常采用视觉方式进行定位与跟踪。Liu 等^[96]以微型机器人小鼠胚胎注射研究为例,提出一种在倒置显微镜下操作的细胞方向控制系统。该工作开发一种用于倒置显微镜的紧凑型电动旋转台,将小鼠胚胎的极体定向远离注射部位,以避免细胞器的损伤。使用内部开发的微型装置将许多细胞固定成规则的图案,通过具有平移-旋转-缩放运动模型的视觉跟踪算法跟踪极体,向基于图像的视觉伺服控制器提供图像位置反馈。Wong 等^[97]对单个生物胚胎细胞进行显微操作,使用计算机生成的模型导出并验

证了使用二维显微明场图像部分确定细胞胚胎的三维角位置的几何模型。通过阈值分割等计算机视觉算法,将该模型应用于旋转的卵裂期小鼠胚胎,展示部分 3D 旋转跟踪。

在工业领域,晶圆的检测与定位同样采用光学显微视觉方式进行,晶圆图案表面具备复杂的特征和平整的形貌,有助于定位测量算法的提取与应用。晶圆由许多个相同的芯片组成,因此其图案整体呈周期性分布,涉及的算法类似于周期性图案方法。而晶圆中每个芯片内图案特殊呈非周期分布,因此特征匹配、模板匹配等方式通常用来实现精确的定位。同时,晶圆中每个芯片呈正方形且边界清晰,Tien 等^[98]采用边缘提取的方式获取晶圆旋转参数信息。Chen 等^[99]介绍了一种基于远心镜头的光纤精密闭环对准新方法。他们提出一种快速、高精度的光纤玻璃芯图像处理算法,通过亚像素边缘检测获取目标边缘信息,通过将极线约束与几何约束相结合来解决立体匹配问题,实现光纤的 3D 恢复。

4 基于光学显微视觉的精密定位测量应用前景

随着图像处理技术和计算机算力的快速发展,视

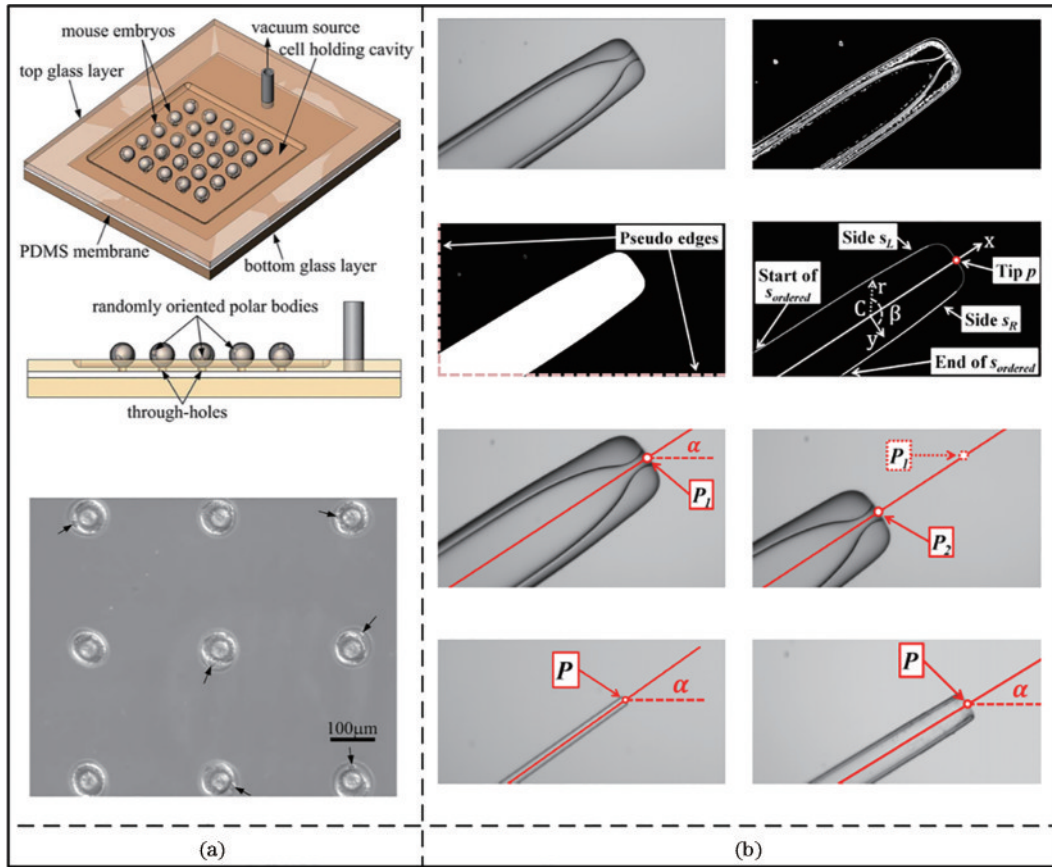


图 12 生物细胞定位技术。(a) 用于固定小鼠胚胎的微型装置示意图和 3×3 固定细胞阵列^[96]; (b) 微量移液器分割^[97]
 Fig. 12 Biological cell localization technology. (a) Schematic of microdevice for immobilizing mouse embryos and 3×3 array of immobilized cells^[96]; (b) micropipette segmentation^[97]

觉定位方法在智能精密测量与制造领域获得越来越多的关注^[100]。与激光干涉仪或光栅编码器等其他非接触测量技术相比,基于光学显微视觉的精密定位测量的优势在于可以实现单传感器多自由度测量,抗环境干扰性弱^[84]。此外,视觉测量设备容易实现微型化、智能化、数字化、网络化等多种功能。基于光学显微视觉的精密定位测量可为实际工程应用中的产品的加工定位、工艺制造和质量控制提供精确而可靠的反馈信息,拥有广泛的实际应用潜力和显著的推广价值。本节主要探讨光学显微视觉在众多高科技领域中的精密定位测量应用,随后展望未来光学显微视觉精密定位测量应用的发展趋势。

4.1 显微视觉定位测量的应用领域

主要介绍光学显微视觉定位测量在微纳制造^[101]、生物医学^[102]和材料科学^[103]等领域的应用潜力,如图 13 所示。未来,随着技术的不断创新和发展,光学显微视觉定位测量有望进一步提升性能和扩展应用领域。

1) 微纳制造。光学显微视觉定位测量可以实现微小零件的精确定位和尺寸测量,以及监测和控制微纳级别的加工过程。随着微电子芯片、纳米机械系统、微电子器件等制造尺寸需求不断减小和复杂度逐渐增

加,该方法为实现更高精度和更加稳定的微纳加工和装配提供了重要手段。结合图像特征提取匹配算法和强鲁棒性的反馈控制系统,测量装备可以达到纳米级三自由度定位的精度,并且通过识别晶圆表面特征图案,能够实时监控和微调晶圆姿态,从而确保不同层次图案的准确叠加,提高集成电路的质量和产量^[104-105]。此外,该技术还可以为微纳机器人提供精确定位和导航能力^[106],使其感知周围环境,准确地与微小尺度物体交互,完成微纳器件操纵、组装和刻蚀等任务。

2) 生物医学。光学显微视觉在生物医学领域常用于显微操纵和生物材料分析,实现对细胞和微粒的精确定位和操作,完成生物样本的注射、植入和微操作等。未来,光学显微视觉定位测量有望在生物医学领域进一步推动疾病诊断、药物研发和治疗策略的发展。在显微镜下定位细胞并且在活体组织中进行实时跟踪^[107],有利于更好地理解细胞行为和互动,根据细胞位置信息来引导微纳尺度探针对样品进行精细无损的操纵,或者将药物注射到识别定位的病变细胞位置^[108],这在细胞分离、组织切片、蛋白质分析、肿瘤治疗、基因编辑等领域具有巨大潜力。

3) 材料科学。通过结合光学显微观察和定位测量,光学显微视觉定位测量可以实时监测材料的微观

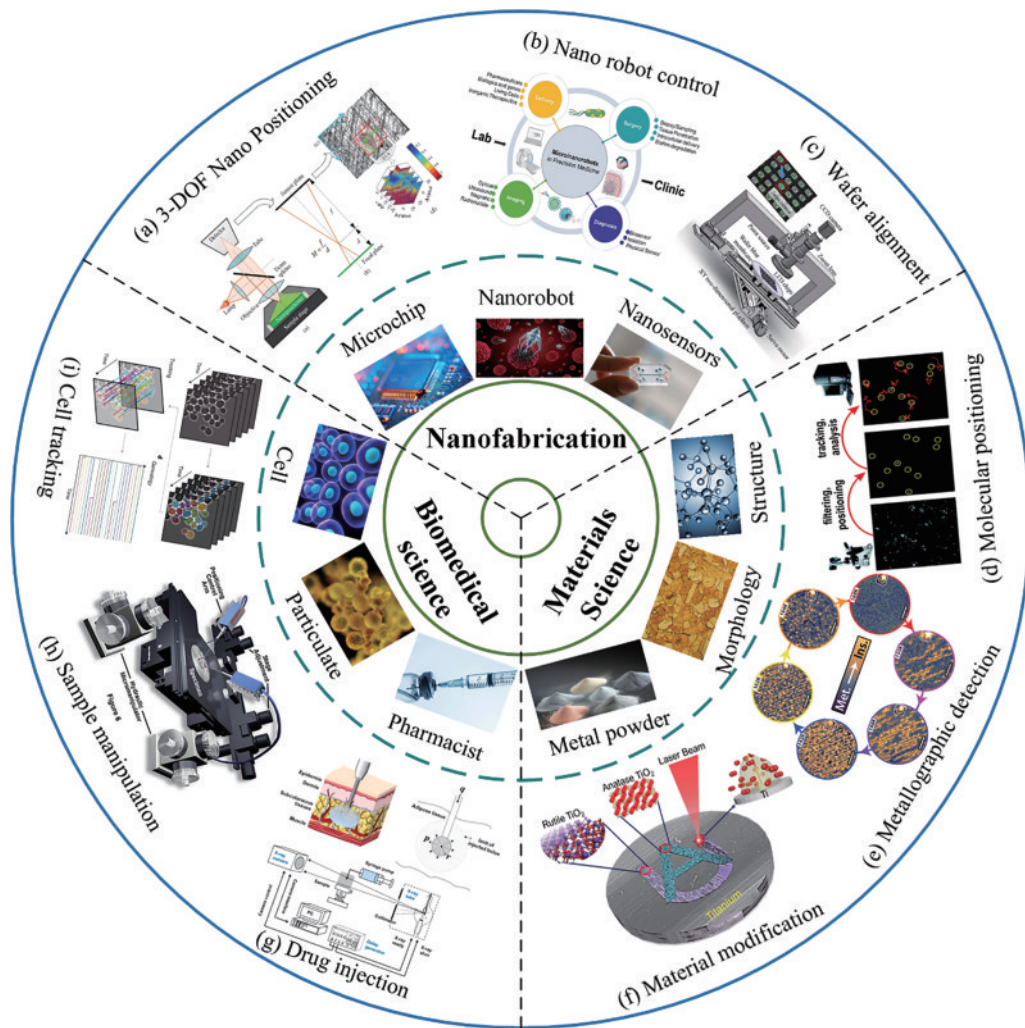


图 13 显微视觉定位测量的应用领域。(a) 三自由度纳米定位^[105]; (b) 微纳机器人控制^[106]; (c) 晶圆对齐^[104]; (d) 单分子定位; (e) 金相检测^[109]; (f) 材料改性^[110]; (g) 药物注射^[108]; (h) 样本微操作; (i) 细胞追踪^[107]

Fig. 13 Application fields of micro-vision positioning measurement. (a) Three degrees of freedom nano-positioning^[105]; (b) micro-nano robot control^[106]; (c) wafer alignment^[104]; (d) single-molecule positioning; (e) metallographic detection^[109]; (f) material modification^[110]; (g) drug injection^[108]; (h) sample micromanipulation; (i) cell tracking^[107]

结构演变、表面形貌和力学性能等关键参数,这对材料设计、工艺优化和质量控制具有重要意义。该方法有望推动新材料的发现、性能提升和应用范围的进一步发展,具体可表现为:利用显微定位视觉技术监控材料的表面处理、薄膜涂层或纳米结构的制备过程^[36],如检测样品的晶体结构、相态变化和组织性质^[109],甚至精确定位和表征材料中的单分子,为材料性能和品质控制提供可靠的数据支撑,从而实现对材料性能的定向调控。

4.2 显微视觉定位测量的未来发展

随着科学技术的不断进步,光学显微视觉精密定位测量技术将继续发展和创新。一方面,光学成像技术本身将不断提升,包括光源、镜头、探测器等硬件设备的改进,以实现更高的分辨率、更低的噪声和更快的成像速度。另一方面,新的智能化算法也将不断涌现,利用机器学习和人工智能的技术来进一步优化光学显微视觉精密定位测量的效率和准确性。接下来探讨了

光学显微视觉精密定位测量应用的未来发展方向,主要包括硬件设备的改进与创新及匹配算法的设计与优化。

4.2.1 硬件设备的改进与创新

光学成像技术的持续进步在很大程度上得益于光源、镜头和探测器等硬件设备的不断发展。这些关键元素的改进与创新不仅提升了成像分辨率和质量,也为光学领域带来了深刻的变革,其发展路线如图 14 所示。具有单色性、方向性和高亮度特点的激光光源为高分辨率、高对比度成像提供了强有力的支持。激光光源的发展从最初的连续激光器到现代的多种激光器类型(如氦氖激光器、固态激光器、半导体激光器、飞秒激光器等)不断推动着光学成像技术的进步^[111-112]。近年来,随着纳米技术的发展,纳米光源的精确调控和自发辐射特性在局部增强光学、超分辨率显微镜、荧光成像等领域显示出独特潜力^[113],为光学成像带来了全新的可能性。镜头作为光学成像中的关键元

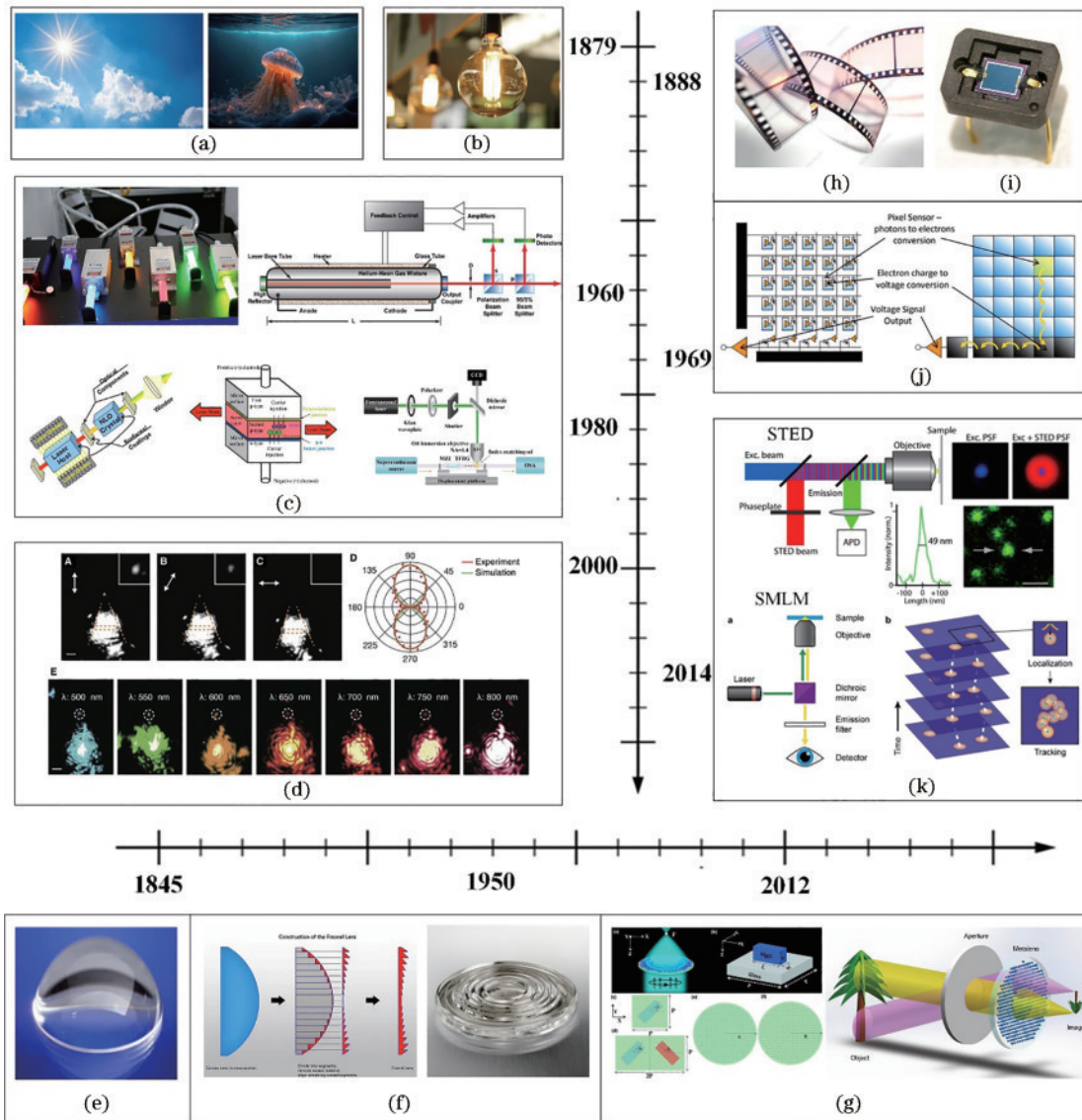


图 14 光学成像硬件设备的发展路线。(a) 自然光源；(b) 白炽灯；(c) 激光光源^[111-112]；(d) 纳米光源^[113]；(e) 球面透镜；(f) 菲涅耳透镜；(g) 超透镜^[115-116]；(h) 感光底片；(i) 光电二极管；(j) CCD 和 CMOS^[117]；(k) 超分辨率探测器^[118-119]

Fig. 14 Development route of optical imaging hardware equipment. (a) Natural light source; (b) incandescent lamp; (c) laser light source^[111-112]; (d) nano light source^[113]; (e) spherical lens; (f) Fresnel lens; (g) superlens^[115-116]; (h) photosensitive film; (i) photodiode; (j) CCD and CMOS^[117]; (k) super-resolution detector^[118-119]

素,其折射率、透镜设计和光学改善技术对成像质量有着重要影响。随着先进的材料和制造工艺的发展,光学镜头的发展经历了从球面透镜到菲涅耳透镜,再到超透镜的演进过程,镜头的光学性能不断提升,不再受传统折射限制,可以实现像散和色散的补偿,同时在纳米尺度下聚焦光线,这种技术的突破性进展为超分辨率成像和光学信息处理提供了新的可能性^[114-116]。探测器的发展是光学成像技术进步的另一个重要驱动因素。从传统的感光底片、光电二极管到数字化图像和高灵敏度的探测器,如 CCD、CMOS^[117]、STED^[118]以及 SMLM^[119]等,探测器的改进直接影响到

成像的灵敏度、动态范围、数据获取速率和分辨率。现代成像技术的数字化趋势使得成像数据可以更方便地得到记录、处理和共享,从而推动了研究和应用的广泛发展。此外,成像系统与处理器芯片的集成化、视觉测量设备的小型化也是视觉精密定位测量的重要发展方向。

4.2.2 匹配算法的设计与优化

图像匹配算法的设计和优化对提升光学显微视觉精密定位测量精度具有重要意义。图像匹配算法的核心思想是通过提取、描述和匹配图像中的特征,以及进行几何校正和误差估计,实现不同图像间的关联和对

齐。在定位测量应用中,常用的图像匹配算法包括特征点匹配、模板匹配和深度学习匹配等,如图 15 所示。模板匹配的主要原理是在图像中滑动一个预定义的模板,寻找与模板最相似的区域。模板匹配简单直观,具有三自由度、精度高等优点,适用于目标较大、背景差异较大的情况。然而,模板匹配容易受到目标的旋转、缩放和遮挡的影响,且在复杂背景下易出现误匹配^[79, 120-121]。特征点匹配是通过检测图像中的角点、边缘等特征,计算特征描述子,然后进行匹配的。特征点匹配具有较好的鲁棒性,适用于不同视角、光照条件。然而,特征点匹配也可能受到局部变化和遮挡的影响,

且需要人工设置阈值,阈值的选取对匹配结果具有很大的影响^[92, 122]。近年来,深度学习在图像匹配领域取得了突破性进展。卷积神经网络(CNN)等模型可以从大规模数据中学习特征表示,实现更准确的匹配,且深度学习匹配方法在大规模数据和复杂背景下表现出色,具有较好的泛化能力^[123]。大模型可自动提取和匹配图像特征点,实现自适应定位测量,提高了测量的效率和准确性,且匹配正确的特征点对数在纹理较少的表面依然能达 1000 以上。此外,提高测量算法计算的速度,以实现实时可视化和数据反馈,也是视觉测量算法的重要发展方向。

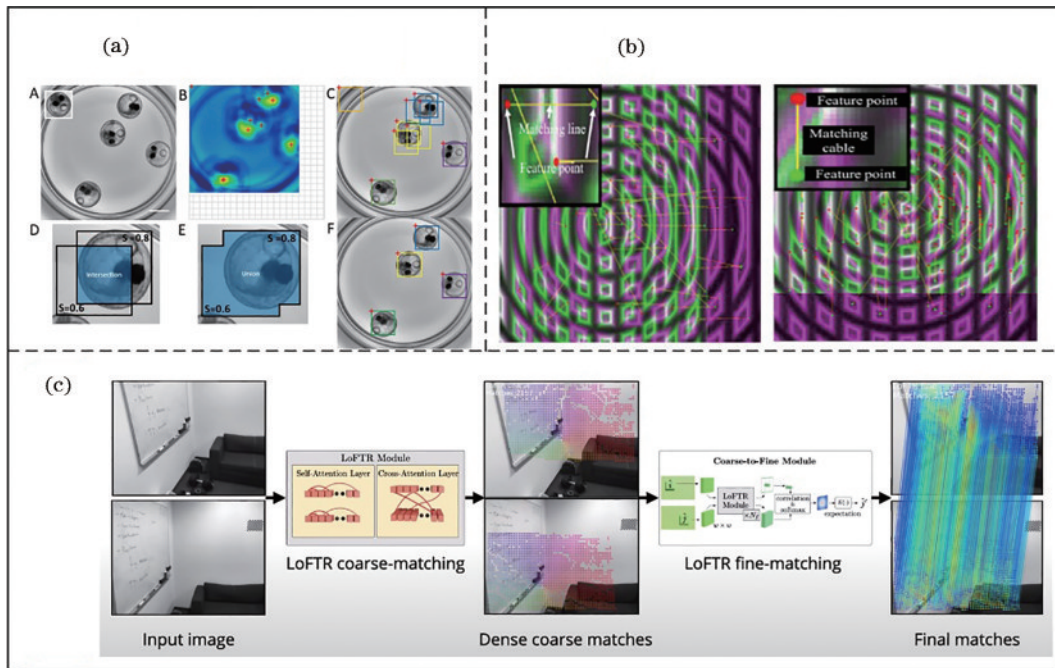


图 15 图像匹配算法对比。(a) 模板匹配^[121]; (b) 特征点匹配^[92]; (c) 深度学习匹配^[123]

Fig. 15 Comparison of image matching algorithms. (a) Template matching^[121]; (b) feature point matching^[92]; (c) deep learning matching^[123]

4.2.3 显微视觉定位方法的创新与应用展望

显微视觉定位方法尽管具有非接触、多自由度、易可视化等优点,但仍有一些方面有待进一步突破。1)大行程和空间多自由度精密测量。显微视觉定位方法在较大量程(≥ 100 mm)条件下实现亚微米级,甚至纳米级测量分辨率具有极大应用潜力。其测量自由度能力从平面单自由度测量到空间多自由度测量发展。已有空间多自由度测量普遍存在精度较低或视场较小的问题,多目测量方法或分时测量方法是提高多自由度测量精度的潜在方法,但精度更高、效率更高的空间多自由度测量方法应该被提出,比如视觉方法和其他传感器结合的方法等。2)紧凑化、集成化、标准化的硬件结构。目前研究工作所采用的镜头和相机各异,而显微视觉精密定位系统的硬件结构对振动、光轴方向偏差等因素尤为敏感,因此设计更为紧凑的结构,以降低振动因素的影响十分有必要。目前已有研究工作去

掉了镜头或者选用小长度镜头以降低振动影响,实现更为紧凑的结构。相机的安装方式对测量精度也有较大影响,需要仔细考虑。此外,相机线缆也限制了安装的方便性,USB3.0相机仅用一根线缆实现供电和数据传输,但传输带宽仍然较小,而DSP芯片与相机集成的方法能大大简化结构,目前一些工作已基于DSP芯片和视觉系统集成开发了编码器产品。3)简单、快速的标定方法。目前,显微视觉测量标定方法一般在测量前安装精密制造的棋盘格拍摄多张图像以标定像素大小和镜头畸变等,此方式需要反复安装,方便性差。因此,实现自标定能大大提升测量效率。基于绝对编码的方式扩大了显微视觉方法的量程,但编码图案由于制造误差因素一般也需要标定,因此如何快速标定测量图案也是重点之一。4)测量数据的实时反馈。将测量的位置数据实时动态反馈到控制系统对工业应用有一定意义。然而,显微视觉测量方法的计算

效率、传输带宽、采样频率等限制了系统的实际应用,应该进一步提高这些参量。同时,基于显微视觉测量数据的运动控制算法和控制系统也有待进一步研究。

在应用方面,目前显微视觉测量方法已经用于平台定位、微纳器件装配、细胞力测量、材料应变测量等场合。显微视觉测量应用的趋势之一是发展出标准化的测量传感器,使其能够以低成本、高效率、非接触获得测量数据。显微视觉算法可以从最新的宏观视觉方法获取思路,而精密视觉测量方法也可应用于宏观场景,如工业机器人的标定、大型零件的辅助装配等。

总体而言,光学显微视觉精密定位测量在众多高新领域中有广泛的应用,它为精密定位和尺寸测量提供了非接触、高分辨率和高精度的解决方案,推动了这些领域的发展和进步。随着技术的不断进步和創新,光学显微视觉在精密定位测量应用中的前景将更加广阔和多样化。

5 结 论

近年来,精密定位测量技术无论是在工业领域还是在生物领域都发挥着至关重要的作用,而基于光学显微视觉的精密定位测量技术因具备可视化、易于标定等优势而逐步取代传统的基于激光干涉仪与光栅尺的定位测量技术。因此本文针对光学显微精密定位测量从 3 个方面进行综述与展望。

1) 首先总结了现有的光学显微系统成像模型与光照模型。在光照模型中,分析了明场成像与暗场成像两种常用的光照模型和仿真过程。同时,根据光学显微成像中难以克服的衍射极限问题,分析与总结了现有的点扩散函数。在成像模型中,分析了透视投影与平行投影两种模型的描述及适用场合,同时也总结了各自的标定方法。

2) 其次根据是否使用标靶图案对显微定位测量算法进行分类与分析,着重在基于特定图案的定位测量算法中研究周期性图案、伪周期性图案及非周期性图案的制作方式、定位算法和定位性能与指标。定位指标包括测量精度、测量自由度、测量分辨率、测量效率等。综合分析了不同图案的功能与优势。

3) 最后对光学显微视觉定位测量技术的应用进行了总结与展望,包括应用领域与未来发展趋势。得到了光学显微定位测量技术在目前行业发展中的突破口及技术优势与瓶颈,着重在生物领域与工业半导体行业阐述了光学精密定位测量技术的发展优势。

参 考 文 献

- [1] Gao W, Kim S W, Bosse H, et al. Measurement technologies for precision positioning[J]. *CIRP Annals*, 2015, 64(2): 773-796.
- [2] He S F, Tang H, Zhang K F, et al. A flip-chip alignment system with the property of deviation self-correction at the nanoscale[J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2021, 68(3): 2345-2355.
- [3] Zimmermann S, Tiemerding T, Fatikow S. Automated robotic manipulation of individual colloidal particles using vision-based control[J]. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 2015, 20(5): 2031-2038.
- [4] Marturi N, Tamadazte B, Dembélé S, et al. Image-guided nanopositioning scheme for SEM[J]. *IEEE Transactions on Automation Science and Engineering*, 2018, 15(1): 45-56.
- [5] Pang C K, Wu D, Shi H T, et al. Photon-counting laser interferometer for absolute distance measurement on rough surface[J]. *Review of Scientific Instruments*, 2019, 90(8): 083101.
- [6] Shishova M V, Odinokov S B, Lushnikov D S, et al. Mathematical modeling of signal transfer process into optical system of a linear displacement encoder[J]. *Procedia Engineering*, 2017, 201: 623-629.
- [7] Zhou C, Gong Z, Chen B K, et al. A closed-loop controlled nanomanipulation system for probing nanostructures inside scanning electron microscopes[J]. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 2016, 21(3): 1233-1241.
- [8] Ding H Y, Shi C Y, Ma L, et al. Visual servoing-based nanorobotic system for automated electrical characterization of nanotubes inside SEM[J]. *Sensors*, 2018, 18(4): 1137.
- [9] Cheng P, Menq C H. Visual tracking of six-axis motion rendering ultraprecise visual servoing of microscopic objects[J]. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 2018, 23(4): 1564-1572.
- [10] Wang R Z, Zhang X M. Optimal design of a planar parallel 3-DOF nanopositioner with multi-objective[J]. *Mechanism and Machine Theory*, 2017, 112: 61-83.
- [11] Yang M, Wang Y, Liu Z H, et al. A monocular vision-based decoupling measurement method for plane motion orbits[J]. *Measurement*, 2022, 187: 110312.
- [12] Yao S, Li H, Pang S Q, et al. A review of computer microvision-based precision motion measurement: principles, characteristics, and applications[J]. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 2021, 70: 5007928.
- [13] Voelkel R, Vogler U, Bich A, et al. Advanced mask aligner lithography: new illumination system[J]. *Optics Express*, 2010, 18(20): 20968-20978.
- [14] Lereu A L, Passian A, Dumas P. Near field optical microscopy: a brief review[J]. *International Journal of Nanotechnology*, 2012, 9(3/4/5/6/7): 488.
- [15] Shi W C, Zheng J M, Li Y, et al. Measurement and modeling of bidirectional reflectance distribution function (BRDF) on cutting surface based on the coaxial optical microscopic imaging[J]. *Optik*, 2018, 170: 278-286.
- [16] Mehta N, Mahigir A, Veronis G, et al. Hyperspectral dark field optical microscopy for orientational imaging of a single plasmonic nanocube using a physics-based learning method[J]. *Nanoscale Advances*, 2022, 4(19): 4094-4101.
- [17] Young G, Kukura P. Interferometric scattering

- microscopy[J]. Annual Review of Physical Chemistry, 2019, 70: 301-322.
- [18] Chai H T, Cao P, Yang Y Y, et al. Numerical simulation research and applications on scattering imaging of surface defects on optical components[J]. Proceedings of SPIE, 2016, 10023: 100230L.
- [19] Zhang Y H, Yang Y Y, Li C, et al. Defects evaluation system for spherical optical surfaces based on microscopic scattering dark-field imaging method[J]. Applied Optics, 2016, 55(23): 6162-6171.
- [20] Mehta S B, Oldenbourg R. Image simulation for biological microscopy: microlith[J]. Biomedical Optics Express, 2014, 5(6): 1822-1838.
- [21] Zhu Z J, Fang X M, Zhao C Y. Influence of light intensity and magnification on the precision of nanoscale positioning in micro-vision-based dark-field imaging[J]. Optics and Lasers in Engineering, 2023, 169: 107753.
- [22] Svoboda D, Kozubek M, Stejskal S. Generation of digital phantoms of cell nuclei and simulation of image formation in 3D image cytometry[J]. Cytometry Part A, 2009, 75A(6): 494-509.
- [23] Miora R H D, Rohwer E, Kielhorn M, et al. Calculating point spread functions: methods, pitfalls and solutions [EB/OL]. (2023-01-31)[2023-04-05]. <https://arxiv.org/abs/2301.13515>.
- [24] Sage D, Donati L, Soulez F, et al. DeconvolutionLab2: an open-source software for deconvolution microscopy[J]. Methods, 2017, 115: 28-41.
- [25] Griffa A, Garin N, Platform B A O, et al. Comparison of Deconvolution Software in 3D microscopy: a user point of view: part 1[J]. GIT Imaging & Microscopy, 2010, 12(1): 43-45.
- [26] Sage D, Neumann F R, Hediger F, et al. Automatic tracking of individual fluorescence particles: application to the study of chromosome dynamics[J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2005, 14(9): 1372-1383.
- [27] Aguet F, van de Ville D, Unser M. Model-based 2.5-D deconvolution for extended depth of field in brightfield microscopy[J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2008, 17(7): 1144-1153.
- [28] 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.
- [29] Zhou Y, Nelson B J. Calibration of a parametric model of an optical microscope[J]. Optical Engineering, 1999, 38(12): 1989-1995.
- [30] Li H, Zhang X M, Wu H, et al. Line-based calibration of a micro-vision motion measurement system[J]. Optics and Lasers in Engineering, 2017, 93: 40-46.
- [31] Li H, Zhang X M, Zhu B L. Single grid image based calibration of an optical microscope[C]//2017 International Conference on Manipulation, Automation and Robotics at Small Scales (MARSS), July 17-21, 2017, Montreal, QC, Canada. New York: IEEE Press, 2017.
- [32] Ammi M, Fremont V, Ferreira A. Automatic camera-based microscope calibration for a telemicromanipulation system using a virtual pattern[J]. IEEE Transactions on Robotics, 2009, 25(1): 184-191.
- [33] Chen Z, Liao H Y, Zhang X M. Telecentric stereo micro-vision system: calibration method and experiments [J]. Optics and Lasers in Engineering, 2014, 57: 82-92.
- [34] 卢清华, 张宪民, 范彦斌. 基于计算机微视觉的鲁棒多尺度平面微运动测量[J]. 机械工程学报, 2009, 45(2): 164-169, 177.
- Lu Q H, Zhang X M, Fan Y B. Robust multiscale method for in-plane micro-motion measurement based on computer micro-vision[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2009, 45(2): 164-169, 177.
- [35] Clark L, Shirinzadeh B, Bhagat U, et al. A vision-based measurement algorithm for micro/nano manipulation[C]//2013 IEEE/ASME International Conference on Advanced intelligent Mechatronics, July 9-12, 2013, Wollongong, NSW, Australia. New York: IEEE Press, 2013: 100-105.
- [36] Sandoz P, Ravassard J C, Dembele S, et al. Phase-sensitive vision technique for high accuracy position measurement of moving targets[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2000, 49(4): 867-872.
- [37] Saveljev V, Son J Y, Lee H, et al. Non-contact measurement of vibrations using deferred moiré patterns [J]. Advances in Mechanical Engineering, 2023, 15(4): 168781322211438.
- [38] Jin J, Zhao L N, Xu S L. High-precision rotation angle measurement method based on monocular vision[J]. Journal of the Optical Society of America A, 2014, 31(7): 1401-1407.
- [39] Sandoz P, Bonnans V, Gharbi T. High-accuracy position and orientation measurement of extended two-dimensional surfaces by a phase-sensitive vision method[J]. Applied Optics, 2002, 41(26): 5503-5511.
- [40] Ri S, Fujigaki M, Morimoto Y. Sampling Moiré method for accurate small deformation distribution measurement [J]. Experimental Mechanics, 2010, 50(4): 501-508.
- [41] Ibaraki S, Tanizawa Y. Vision-based measurement of two-dimensional positioning errors of machine tools[J]. Journal of Advanced Mechanical Design, Systems, and Manufacturing, 2011, 5(4): 315-328.
- [42] Chen W H, Li B R, Zhao T, et al. Vision measurement system for position-dependent geometric error calibration of five-axis machine tools[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2022, 123(11/12): 3969-3981.
- [43] Li W M, Jin J, Li X F, et al. Method of rotation angle measurement in machine vision based on calibration pattern with spot array[J]. Applied Optics, 2010, 49(6): 1001-1006.
- [44] 李立春, 于起峰, 雷志辉, 等. 基于数字图像的高精度面内转角测量方法[J]. 光学学报, 2005, 25(4): 491-496.
- Li L C, Yu Q F, Lei Z H, et al. High-accuracy measurement of rotation angle based on image[J]. Acta Optica Sinica, 2005, 25(4): 491-496.
- [45] Morimoto Y, Fujigaki M, Masaya A, et al. Accurate displacement measurement for landslide prediction by

- sampling moiré method[J]. *Advanced Materials Research*, 2009, 79/80/81/82: 1731-1734.
- [46] Ri S, Hayashi S, Ogiwara S, et al. Accurate full-field optical displacement measurement technique using a digital camera and repeated patterns[J]. *Optics Express*, 2014, 22(8): 9693-9706.
- [47] Sugiura H, Sakuma S, Kaneko M, et al. On-chip measurement of cellular mechanical properties using moiré fringe[C]//2015 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA), May 26-30, 2015, Seattle, WA, USA. New York: IEEE Press, 2015: 3513-3518.
- [48] Wang Q H, Ri S E. Sampling Moiré method for full-field deformation measurement: a brief review[J]. *Theoretical and Applied Mechanics Letters*, 2022, 12(1): 100327.
- [49] Irino N, Shimoike M, Mori K, et al. A vision-based machine accuracy measurement method[J]. *CIRP Annals*, 2020, 69(1): 445-448.
- [50] Yamahata C, Sarajlic E, Stranczl M, et al. Subpixel translation of MEMS measured by discrete Fourier transform analysis of CCD images[C]//2011 16th International Solid-State Sensors, Actuators and Microsystems Conference, June 5-9, 2011, Beijing, China. New York: IEEE Press, 2011: 1697-1700.
- [51] 苏建东, 齐晓慧, 段修生. 基于单目视觉和棋盘靶标的平面姿态测量方法[J]. *光学学报*, 2017, 37(8): 0815002. Su J D, Qi X H, Duan X S. Plane pose measurement method based on monocular vision and checkerboard target[J]. *Acta Optica Sinica*, 2017, 37(8): 0815002.
- [52] Lu Q, Zhou H B, Li Z Q, et al. Calibration of five-axis motion platform based on monocular vision[J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2022, 118(9): 3487-3496.
- [53] Yin S, Zhou H B, Ju X, et al. Vision-based measurement for decoupling identification of geometric errors of rotating axes for five-axis platform[J]. *Measurement Science and Technology*, 2022, 33(4): 045007.
- [54] Yang J C, Man J B, Xi M, et al. Precise measurement of position and attitude based on convolutional neural network and visual correspondence relationship[J]. *IEEE Transactions on Neural Networks and Learning Systems*, 2020, 31(6): 2030-2041.
- [55] 高飞, 令狐乾锦, 葛一粟, 等. 基于位置判别的激光 QR 二维码定位方法[J]. *计算机辅助设计与图形学学报*, 2017, 29(6): 1060-1067. Gao F, Linghu Q J, Ge Y S, et al. Location method of laser QR code based on position discrimination[J]. *Journal of Computer-Aided Design & Computer Graphics*, 2017, 29(6): 1060-1067.
- [56] Li X, Liu W, Pan Y, et al. A knowledge-driven approach for 3D high temporal-spatial measurement of an arbitrary contouring error of CNC machine tools using monocular vision[J]. *Sensors*, 2019, 19(3): 744.
- [57] Wang H, Wang J, Chen B, et al. Absolute optical imaging position encoder[J]. *Measurement*, 2015, 67: 42-50.
- [58] André A N, Sandoz P, Mauzé B, et al. Robust phase-based decoding for absolute (X , Y , θ) positioning by vision[J]. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 2021, 70: 5001612.
- [59] Guelpa V, Sandoz P, Vergara M A, et al. 2D visual micro-position measurement based on intertwined twin-scale patterns[J]. *Sensors and Actuators A: Physical*, 2016, 248: 272-280.
- [60] Masa P, Franzi E, Urban C. Nanometric resolution absolute position encoders[C]//13th European Space Mechanisms and Tribology Symposium, September 23-25, 2009, Vienna, Austria. [S.l.: s.n.], 2009: 1-3.
- [61] Kim J A, Kim J W, Kang C S, et al. Absolute angle measurement using a phase-encoded binary graduated disk [J]. *Measurement*, 2016, 80: 288-293.
- [62] André A N, Sandoz P, Mauzé B, et al. Sensing one nanometer over ten centimeters: a microencoded target for visual in-plane position measurement[J]. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 2020, 25(3): 1193-1201.
- [63] André A N, Sandoz P, Jacquot M, et al. Pose measurement at small scale by spectral analysis of periodic patterns[J]. *International Journal of Computer Vision*, 2022, 130(6): 1566-1582.
- [64] Kim J A, Lee J Y, Kang C S, et al. Measurement of six-degree-of-freedom absolute postures using a phase-encoded pattern target and a monocular vision system[J]. *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*, 2023, 24(7): 1191-1203.
- [65] Li X, Liu W, Pan Y, et al. Monocular-vision-based contouring error detection and compensation for CNC machine tools[J]. *Precision Engineering*, 2019, 55: 447-463.
- [66] Li X, Liu W, Pan Y, et al. Binocular vision-based 3D method for detecting high dynamic and wide-range contouring errors of CNC machine tools[J]. *Measurement Science and Technology*, 2019, 30(12): 125019.
- [67] Zhao H N, Niu R R, Fan M Y, et al. 2D absolute position measurement based on the hybrid encoding method[J]. *Review of Scientific Instruments*, 2023, 94 (2): 025101.
- [68] Zea J A G, Sandoz P, Robert L. Position encryption of extended surfaces for subpixel localization of small-sized fields of observation[C]//2009 International Symposium on Optomechatronic Technologies, September 21-23, 2009, Istanbul, Turkey. New York: IEEE Press, 2009: 22-27.
- [69] Tan N, Clevy C, Laurent G J, et al. Characterization and compensation of XY micropositioning robots using vision and pseudo-periodic encoded patterns[C]//2014 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA), May 31-June 7, 2014, Hong Kong, China. New York: IEEE Press, 2014: 2819-2824.
- [70] Zhou P, Goodson K E. Subpixel displacement and deformation gradient measurement using digital image/speckle correlation[J]. *Optical Engineering*, 2001, 40(8): 1613-1620.

- [71] Zhang X, Zhang X M, Wu H, et al. A robust rotation-invariance displacement measurement method for a micro-/ nano-positioning system[J]. *Measurement Science and Technology*, 2018, 29(5): 055402.
- [72] Li H, Zhu B L, Chen Z, et al. Realtime in-plane displacements tracking of the precision positioning stage based on computer micro-vision[J]. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2019, 124: 111-123.
- [73] Cheng P, Menq C H. Ultraprecise three-axis visual motion tracking of microscopic objects[J]. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 2017, 66(10): 2597-2605.
- [74] Zhao C Y, Cheung C, Liu M Y. Integrated polar microstructure and template-matching method for optical position measurement[J]. *Optics Express*, 2018, 26(4): 4330-4345.
- [75] Zhao C Y, Cheung C F, Xu P. High-efficiency sub-microscale uncertainty measurement method using pattern recognition[J]. *ISA Transactions*, 2020, 101: 503-514.
- [76] Zhao C Y, Li Y, Yao Y X, et al. Random residual neural network-based nanoscale positioning measurement [J]. *Optics Express*, 2020, 28(9): 13125-13130.
- [77] Zhao C Y, Cheung C F, Xu P. Optical nanoscale positioning measurement with a feature-based method[J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2020, 134: 106225.
- [78] Dong Y L, Pan B. A review of speckle pattern fabrication and assessment for digital image correlation [J]. *Experimental Mechanics*, 2017, 57(8): 1161-1181.
- [79] Gauvin C, Jullien D, Doumalin P, et al. Image correlation to evaluate the influence of hygrothermal loading on wood[J]. *Strain*, 2014, 50(5): 428-435.
- [80] Chen B, Pan B. Camera calibration using synthetic random speckle pattern and digital image correlation[J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2020, 126: 105919.
- [81] Souto Janeiro A, Fernández López A, Chimeno Manguan M, et al. Three-dimensional digital image correlation based on speckle pattern projection for non-invasive vibrational analysis[J]. *Sensors*, 2022, 22(24): 9766.
- [82] Yamaguchi I. A laser-speckle strain gauge[J]. *Journal of Physics E: Scientific Instruments*, 1981, 14(11): 1270-1273.
- [83] Peters W H, Ranson W F. Digital imaging techniques in experimental stress analysis[J]. *Optical Engineering*, 1982, 21(3): 427-431.
- [84] Bruck H A, McNeill S R, Sutton M A, et al. Digital image correlation using Newton-Raphson method of partial differential correction[J]. *Experimental Mechanics*, 1989, 29(3): 261-267.
- [85] Atkinson D, Becker T. A 117 line 2D digital image correlation code written in MATLAB[J]. *Remote Sensing*, 2020, 12(18): 2906.
- [86] Zhao C Y, Cheung C, Liu M Y. Modeling and simulation of a machining process chain for the precision manufacture of polar microstructure[J]. *Micromachines*, 2017, 8(12): 345.
- [87] Zhao C Y, Cheung C F, Liu M Y. Nanoscale measurement with pattern recognition of an ultra-precision diamond machined polar microstructure[J]. *Precision Engineering*, 2019, 56: 156-163.
- [88] Zheng L, Yang Y, Tian Q. SIFT meets CNN: a decade survey of instance retrieval[J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2018, 40(5): 1224-1244.
- [89] Bay H, Ess A, Tuytelaars T, et al. Speeded-up robust features (SURF) [J]. *Computer Vision and Image Understanding*, 2008, 110(3): 346-359.
- [90] Rublee E, Rabaud V, Konolige K, et al. ORB: an efficient alternative to SIFT or SURF[C]//2011 International Conference on Computer Vision, November 6-13, 2011, Barcelona, Spain. New York: IEEE Press, 2012: 2564-2571.
- [91] Gao X B, Wang Q, Li X L, et al. Zernike-moment-based image super resolution[J]. *IEEE Transactions on Image Processing*, 2011, 20(10): 2738-2747.
- [92] Zhao C Y, Xiang J, Cheung C F. Sub-microscale precision repeatability position measurement using integrated polar microstructure and feature extraction method[J]. *Measurement*, 2023, 218: 113254.
- [93] Li H L, Fang X M, Zhu Z J, et al. The approach of nanoscale vision-based measurement via diamond-machined surface topography[J]. *Measurement*, 2023, 214: 112814.
- [94] Kudryavtsev A V, Dembélé S, Piat N. Full 3D rotation estimation in scanning electron microscope[C]//2017 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS), September 24-28, 2017, Vancouver, BC, Canada. New York: IEEE Press, 2017: 1134-1139.
- [95] Chowdhury S, Thakur A, Švec P, et al. Automated manipulation of biological cells using gripper formations controlled by optical tweezers[J]. *IEEE Transactions on Automation Science and Engineering*, 2014, 11(2): 338-347.
- [96] Liu X Y, Lu Z, Sun Y. Orientation control of biological cells under inverted microscopy[J]. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 2011, 16(5): 918-924.
- [97] Wong C Y, Mills J K. Cleavage-stage embryo rotation tracking and automated micropipette control: towards automated single cell manipulation[C]//2016 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS), October 9-14, 2016, Daejeon, the Public of Korea. New York: IEEE Press, 2016: 2351-2356.
- [98] Tien C L, Lai Q H, Lin C S. Development of optical automatic positioning and wafer defect detection system [J]. *Measurement Science and Technology*, 2016, 27(2): 025205.
- [99] Chen Z, Zhou D W, Liao H Y, et al. Precision alignment of optical fibers based on telecentric stereo microvision[J]. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 2016, 21(4): 1924-1934.
- [100] Zhang J X, Hu S L, Shi H Q. Deep learning based object

- distance measurement method for binocular stereo vision blind area[J]. *International Journal of Advanced Computer Science and Applications*, 2018, 9(9): 090977.
- [101] Guo B S, Sun J Y, Hua Y H, et al. Femtosecond laser micro/nano-manufacturing: theories, measurements, methods, and applications[J]. *Nanomanufacturing and Metrology*, 2020, 3(1): 26-67.
- [102] Buytaert J A N, Dirckx J J. Design and quantitative resolution measurements of an optical virtual sectioning three-dimensional imaging technique for biomedical specimens, featuring two-micrometer slicing resolution [J]. *Journal of Biomedical Optics*, 2007, 12(1): 014039.
- [103] Morgan D, Jacobs R. Opportunities and challenges for machine learning in materials science[J]. *Annual Review of Materials Research*, 2020, 50: 71-103.
- [104] Wang Z Y, Zhou D Y, Gong S H. Uncalibrated visual positioning using adaptive Kalman filter with dual rate structure for wafer chip in LED packaging[J]. *Measurement*, 2022, 191: 110829.
- [105] Li H, Zhang X M, Yao S, et al. An improved template-matching-based pose tracking method for planar nanopositioning stages using enhanced correlation coefficient[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2020, 20(12): 6378-6387.
- [106] Soto F, Wang J, Ahmed R, et al. Medical micro/nanorobots in precision medicine[J]. *Advanced Science*, 2020, 7(21): 2002203.
- [107] Cuny A P, Ponti A, Kündig T, et al. Cell region fingerprints enable highly precise single-cell tracking and lineage reconstruction[J]. *Nature Methods*, 2022, 19(10): 1276-1285.
- [108] Kim H, Park H, Lee S J. Effective method for drug injection into subcutaneous tissue[J]. *Scientific Reports*, 2017, 7: 9613.
- [109] Mattoni G, Zubko P, Maccherozzi F, et al. Striped nanoscale phase separation at the metal-insulator transition of heteroepitaxial nickelates[J]. *Nature Communications*, 2016, 7: 13141.
- [110] Fathi-Hafshejani P, Johnson H, Ahmadi Z, et al. Phase-selective and localized TiO₂ coating on additive and wrought titanium by a direct laser surface modification approach[J]. *ACS Omega*, 2020, 5(27): 16744-16751.
- [111] Pai K J, Lin C H. Equivalent circuit establishments of a GaN high-electron-mobility transistor and 635 nm laser diode for a short-pulsed rising current simulation[J]. *Processes*, 2021, 9(11): 1975.
- [112] Niu Y N, Jia P G, Su J H, et al. Tunable random fiber laser based on dual-grating structure[J]. *Photonics*, 2023, 10(6): 644.
- [113] Umakoshi T, Tanaka M, Saito Y, et al. White nanolight source for optical nanoimaging[J]. *Science Advances*, 2020, 6(23): eaba4179.
- [114] Tan N Y J, Zhang X Q, Neo D W K, et al. A review of recent advances in fabrication of optical Fresnel lenses[J]. *Journal of Manufacturing Processes*, 2021, 71: 113-133.
- [115] Engelberg J, Zhou C, Mazurski N, et al. Near-IR wide-field-of-view Huygens metalens for outdoor imaging applications[J]. *Nanophotonics*, 2020, 9(2): 361-370.
- [116] Ali F, Aksu S. A hybrid broadband metalens operating at ultraviolet frequencies[J]. *Scientific Reports*, 2021, 11: 2303.
- [117] Topac E. Design of a turbulent flow facility and development of an algorithm for PIV[D]. Wien: Institute of Fluid Mechanics and Heat Transfer, 2018.
- [118] Blom H, Rönnlund D, Scott L, et al. Spatial distribution of Na⁺-K⁺-ATPase in dendritic spines dissected by nanoscale superresolution STED microscopy[J]. *BMC Neuroscience*, 2011, 12: 16.
- [119] Maris J J E, Fu D L, Meirer F, et al. Single-molecule observation of diffusion and catalysis in nanoporous solids [J]. *Adsorption*, 2021, 27(3): 423-452.
- [120] Wu H, Zhang X M, Wang R Z, et al. Displacement measurement of the compliant positioning stage based on a computer micro-vision method[J]. *AIP Advances*, 2016, 6(2): 025009.
- [121] Thomas L S V, Gehrig J. Multi-template matching: a versatile tool for object-localization in microscopy images [J]. *BMC Bioinformatics*, 2020, 21(1): 1-8.
- [122] Karami E, Prasad S, Shehata M. Image matching using SIFT, SURF, BRIEF and ORB: performance comparison for distorted images[EB/OL]. (2017-10-07) [2023-02-04]. <https://arxiv.org/abs/1710.02726>.
- [123] Sun J M, Shen Z H, Wang Y, et al. LoFTR: detector-free local feature matching with transformers[C]//2021 IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR), June 20-25, 2021, Nashville, TN, USA. New York: IEEE Press, 2021: 8918-8927.