

光谱共焦显微成像技术与应用

邵谭彬, 杨克成, 夏珉, 郭文平*

华中科技大学光学与电子信息学院, 湖北 武汉 430074

摘要 光谱共焦显微成像(CCM)技术基于色差共焦原理,利用不同波长的焦点位置不同实现深度测量,并使用共聚焦设置滤除离焦光以及杂散光从而提高信噪比。首先,介绍CCM的基本原理以及不同扫描方案。然后,对CCM的发展历程进行梳理,并阐述CCM的国内外研究进展。针对光学设计、信号产生模型、光谱数据处理、减小串扰等关键问题,对相关的研究方案进行了总结。凭借无损检测、高分辨率、高信噪比、层析成像等诸多优势,CCM技术在生物医学、工业检测等领域得到广泛应用。

关键词 三维成像; 光谱共焦显微成像; 共聚焦显微成像; 超高分辨率; 层析成像

中图分类号 TH742

文献标志码 A

DOI: 10.3788/LOP222655

Techniques and Applications of Chromatic Confocal Microscopy

Shao Tanbin, Yang Kecheng, Xia Min, Guo Wenping*

*School of Optical and Electronic Information, Huazhong University of Science and Technology,
Wuhan 430074, Hubei, China*

Abstract Based on the principle of chromatic aberration confocal microscopy, the chromatic confocal microscopy (CCM) technology utilizes different focal positions of different wavelengths to achieve effective depth measurement; moreover, CCM employs a confocal setting to filter out defocused and stray light to improve the signal-to-noise ratio. This paper first introduces the basic principles of CCM and different scanning schemes, then reviews the development of CCM, and expounds the research progress of CCM at home and abroad. Considering the key issues such as optical design, signal generation model, spectral data processing, and crosstalk reduction, this paper summarizes relevant research schemes. CCM technology has several advantages such as nondestructive testing, high resolution, high signal-to-noise ratio, and effective tomography. Thus, it can be broadly utilized in various fields, including the biomedical, industrial testing, and other fields.

Key words three-dimensional imaging; chromatic confocal microscopy; confocal microscopy; ultra-high resolution; tomographic imaging

1 引言

传统光学显微镜为了实现高的横向分辨率,通常会牺牲视场深度。在对具有多层结构的样品进行观察时,需要轴向移动显微镜来观察样品在不同深度的形貌,这种方法显然不够便利。Courtney-Pratt等^[1]利用物镜的色差来扩展显微镜视场深度,并设计实验证明了该方法用于三维成像的可行性。在此基础上,Molesini等^[2]引入光电二极管阵列进行光谱分析,设计并搭建了基于波长位移编码原理的光学轮廓仪。1987年,

Boyd^[3]将波长位移编码原理推广到共聚焦显微镜技术中,即光谱共焦显微镜(CCM)技术,此后不断有学者从光学设计、光谱信号模型、光谱数据处理、三维成像方案等角度对CCM技术展开研究。伴随着光源技术、图像传感器技术的发展以及计算能力的提升,CCM技术逐步成为一种新的高分辨实时三维成像技术。

对于二元光学、微机电系统等精密器件,相比传统的接触式测量,以光学检测为代表的非接触式测量能更好地适应此类检测需求。主流的光学检测方法中:激光干涉法对湿度、温度、气压等环境因素较敏感;激光

收稿日期: 2022-09-29; 修回日期: 2022-11-06; 录用日期: 2023-01-10; 网络首发日期: 2023-01-20

基金项目: 国家科技部重点研发专项(2022YFB3206000)

通信作者: *wpguo@hust.edu.cn

三角法的精度受光斑大小、外界杂散光等因素影响,另外,对于高反射表面和倾斜表面的测量也受限;而激光扫描共聚焦显微镜需要轴向移动实现深度测量,大大限制了测量速度。CCM 技术利用波长位移编码原理进行深度测量,相比激光三角法分辨率更高,并且 CCM 技术对于表面纹理、倾斜、杂散光等因素不敏感^[4],另外无需轴向扫描,具有层析成像的特点。基于上述优点,CCM 技术在生物医学成像、精密样品的三维检测以及生产加工的在线监测等方面有着广泛的应用前景。

CCM 技术虽然发展较早,市场上也推出了性能良好的商用传感器,但对于该技术国内外鲜有人进行综述工作。国内对于该领域的研究处在追赶阶段,也有少数本土企业进行商用 CCM 的研制,但性能与国外产品仍具有一定差距。因此,对 CCM 技术开展综述工作,对于学术研究和工业应用都具有一定的指导意义。首先介绍 CCM 的基本原理以及主流的三维成像方案,然后针对色散物镜设计、信号产生模型、光谱数据处理、减小串扰等关键问题,总结目前相关领域的研究进展。其次,根据 CCM 所具备的性能优势,介绍其在生物医学成像、精密样品的三维检测以及生产加工的在线监测等领域的应用情况。最后,讨论了 CCM 技术的未来发展方向和应用前景。

2 光谱共焦显微成像基本原理概述

图 1 展示了两种典型的光谱共焦系统结构,其中,

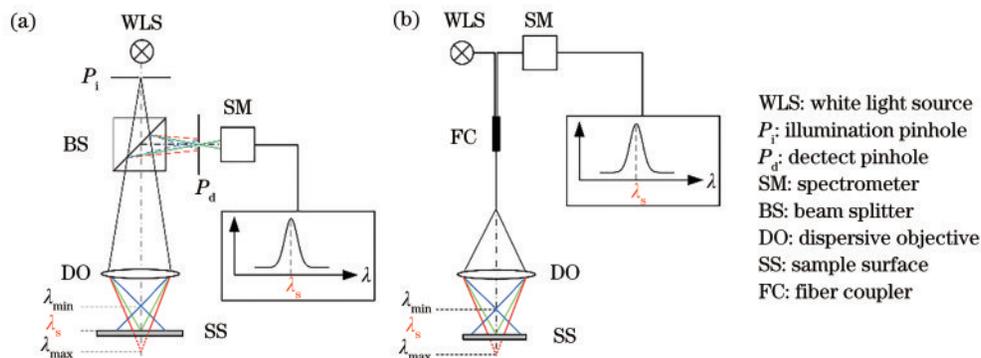


图 1 光谱共焦显微成像系统原理图。(a)基于立方分束器;(b)基于光纤耦合器

Fig. 1 Schematics of chromatic confocal microscopy. (a) Based on beam splitter; (b) based on fiber coupler

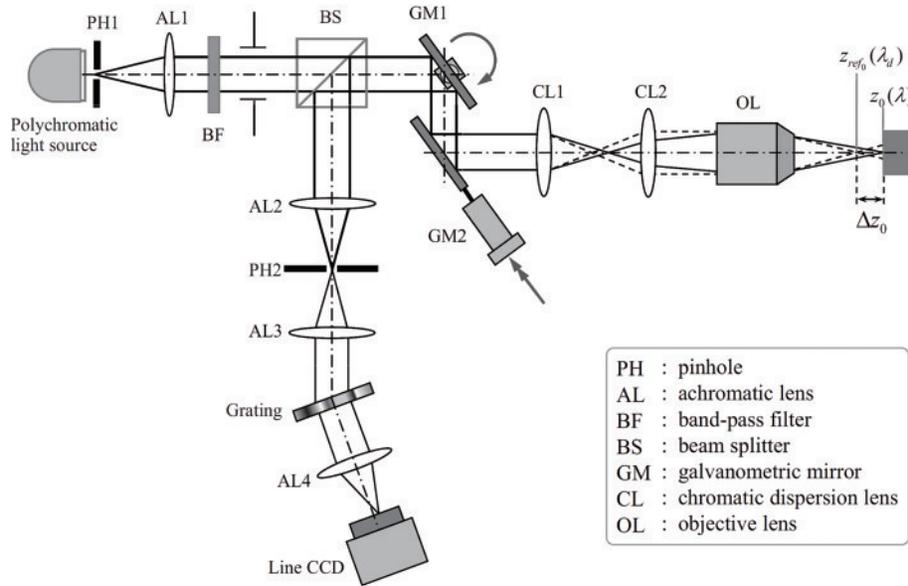
3 光谱共焦显微成像技术分类

光谱共焦显微镜是共聚焦显微镜的推广。共聚焦显微镜用于三维形貌测量时,需要利用机械装置进行轴向扫描,在每一个轴向位置,通过横向扫描获取被测物的光学截面,利用不同轴向位置的光学截面进行三维重建得到三维形貌特征^[8]。光谱共焦显微技术利用折射光学元件或者衍射光学元件的色散特性——焦距随着波长变化,实现轴向扫描^[9]。这种方法免去了轴向扫描机构,但进行三维成像时仍然需要横向扫描。按扫描方式,光谱共焦显微镜可分为点扫描、线扫描以及面阵成像。

λ_{\max} 为光源工作波段的最大波长, λ_{\min} 为光源工作波段的最小波长,两种结构的区别在于图 1(a)使用立方分束器作为分光器件,图 1(b)采用光纤耦合器。图 1(a)中,白光光源发出的复色光照射到照明针孔 P_i 形成一个近似的点光源,点光源发出的复色光经立方分束器 (BS) 传入色散物镜 (DO)。由于物镜的色散作用,不同波长的光将会聚于光轴的不同位置,仅有特定波长的光可以较好地聚焦于样品表面上。图 1 中将该波长记为 λ_s , 波长为 λ_s 的光在样品表面上的光斑半径极小,而其他波长的光斑半径较大,由于探测针孔 P_d 与照明针孔 P_i 具有共轭关系,波长为 λ_s 的光经 BS 反射后,大部分光可以进入探测针孔 P_d ,其他波长的光只有小部分可以通过。通过探测针孔的光传入光谱仪后,光谱仪将获取一个峰值位于 λ_s 处的光谱信号。图 1(a)的方案对安装精度要求较高,共轭针孔必须保证空间的对称性。这对整个系统的安装提出了严苛的要求,并且不利于系统的小型化^[5],但优点在于立方分束器具有较大的通光孔径,对于线扫测量和面阵探测的兼容性较好。图 1(b)的基于 Y 型光纤耦合器的系统结构可以实现光路结构的分离,降低了对安装精度的要求,并且用光纤纤芯替代了针孔进行空间滤波。利用图 1 所示系统可以建立峰值波长与测量位置的一一映射关系,实现波长-位置编码,从而进行位移测量。配合位移台、振镜等设备^[6-7]进行横向点扫描,即可获取被测物的三维形貌特征。

3.1 点扫描光谱共焦显微镜

点扫描光谱共焦显微镜的主流方案包括位移台扫描^[6,10]、光束扫描^[7]、位移台与光束扫描组合^[11]等。1992 年, Browne 等^[6]最早研制的光谱共焦形貌测量仪就是采用二维位移台进行横向扫描的。位移台扫描虽然成像速度较慢、且对载荷有要求,但优势在于结构简单、测量准确,因此时至今日,仍有不少学者采用其进行光谱共焦显微成像的横向扫描^[10,12]。光束扫描是通过使用振镜等设备改变光束的入射角来完成的。光束扫描的优势在于扫描速度快,但是扫描像面为弧面,测量结果需要算法矫正。图 2 展示了 Chun 等^[7]所搭建的

图 2 光束扫描光谱共聚焦显微镜结构图^[7]Fig. 2 Schematic diagram of a beam scanning chromatic confocal microscope^[7]

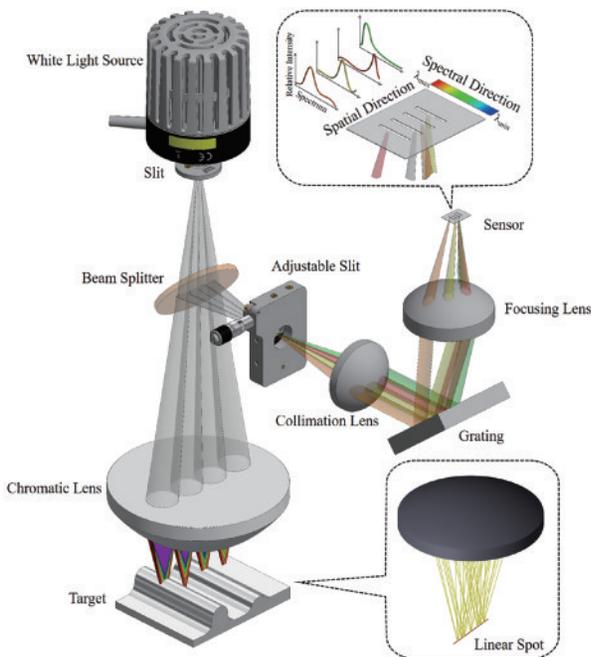
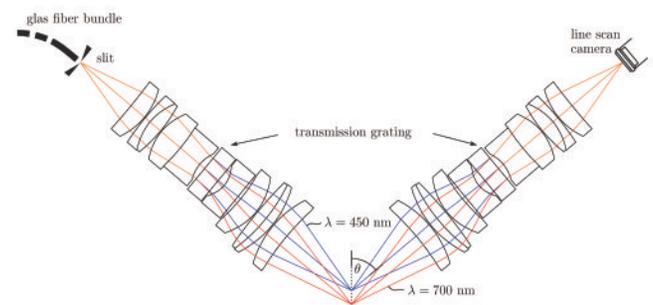
基于二维振镜的光谱共焦表面测量仪,实验证明该系统在 $284 \mu\text{m} \times 284 \mu\text{m}$ 的视场范围内轴向分辨率为 $0.72 \mu\text{m}$ 。

3.2 线扫描光谱共聚焦显微镜

1998年,狭缝扫描共聚焦显微镜技术^[13]首次被应用到光谱共焦显微成像中,并开发出了一种光谱共焦线扫显微系统^[14]。此后不断有学者提出新的线扫方案,从光路结构上主要可以分为两类:单轴式^[14-22]与双轴式^[23-29]。单轴式指照明光路和成像光路共用一个光路,图3展示了单轴系统的典型结构^[20]。可以看出,线

扫描系统与点扫描系统相比,差别在于将点光源换成了线光源,共轭针孔替换成共轭狭缝,探测器由线阵传感器换成面阵传感器,而在原理上并没有太大的变化。

双轴式系统指将照明光轴和成像光轴以一定的角度分开的结构,典型光路如图4所示^[24]。图4中使用多芯光纤束照射狭缝形成线光源,由于镜头中的光栅以及透镜的色散,不同波长的光聚焦在不同位置,并形成一一个共焦平面。照明光路和成像光路关于共焦平面对称,只有聚焦到被测物表面的光才能进入成像光路被线扫相机采集,而离焦光则被极大衰减。对光谱数据进行解码即可得到被测物表面深度信息。

图 3 线扫光谱共焦传感器原理图^[20]Fig. 3 Schematic diagrams of the line-scanning chromatic confocal sensor^[20]图 4 光谱共焦 θ 显微镜结构图^[24]Fig. 4 Drawing of a chromatic confocal θ -microscope^[24]

Wang等^[30]在共聚焦显微镜的研究中指出,双轴设计相比单轴设计在高分辨显微成像中具有许多优势。最重要的优势在于,双轴系统可以在物镜数值孔径相对较低的情况下同时实现亚微米轴向与横向分辨率。两种结构下光斑轴向尺寸的表达式为

$$\Delta z_{\text{dual}} = \frac{0.37\lambda}{A_{\text{NA}} \sin \theta}, \quad (1)$$

$$\Delta z_{\text{single}} = \frac{1.78\lambda}{A_{\text{NA}}^2}, \quad (2)$$

式中： λ 是波长； A_{NA} 是镜头的数值孔径； 2θ 是两个轴的夹角。

双轴系统除了轴向分辨率优于单轴式外，双轴分离的设置有效抑制了聚焦体积外的多重散射，并且无需分束器，使得双轴设计的光通量大大提高，是单轴设计的4倍。进一步研究表明，双轴系统对半透明和多孔材料的灵敏度也比单轴系统要好。另外双轴系统通常使用低数值孔径的镜头，更容易实现大的工作距离与视场^[26]。

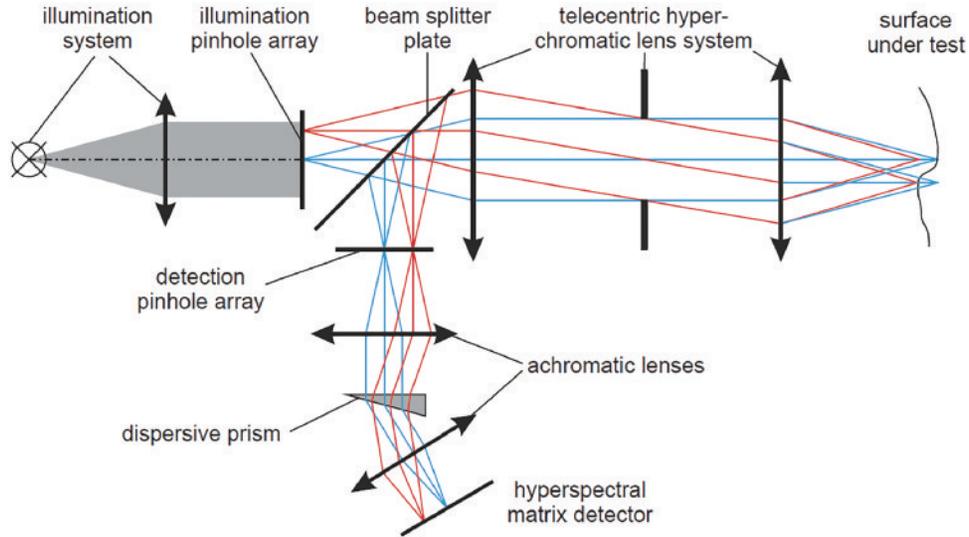


图5 快照式光谱共焦面传感器原理图^[19]

Fig. 5 Schematic of the snapshot chromatic confocal matrix sensor^[19]

使用数字微镜器件(DMD)、液晶显示器(LCD)或者微米发光二极管(microLED)等器件^[16, 33-37]进行点光源阵列扫描是光谱共焦面阵探测的另一种方法。和前一种方法相比,这种方法利用虚拟针孔技术,可以提高重建的对比度和精度。基于LCD和DMD的面阵成像方法的缺陷在于需要外部光源,而microLED每个像素可以独立控制发光,并且具有高速、高亮度、可调谐光谱、小像素尺寸的优点^[38-39],很好地解决了这个问题。2021年, Li等^[37]采用microLED作为点光源阵列

3.3 面阵探测光谱共焦显微镜

面阵探测主要可以分为两种,一种利用微透镜阵列、针孔阵列等方式^[19, 31-32]将光源扩展为点光源阵列进行静态测量。图5展示了在多个横向位置进行并行测量的光谱共焦距离传感器。光源被准直后照射到针孔阵列形成点光源阵列,点光源阵列经色散物镜成像至被测物表面。在探测端设置共轭的针孔阵列收集聚焦到被测物表面的信号。系统结合共焦矩阵传感和快照高光谱成像的概念,通过单次拍摄对样品进行二维阵列成像^[19]。

进行光谱共焦显微镜的横向扫描,图6分别展示了其系统结构和microLED的扫描模式,microLED中的扫描区域被划分为若干个扫描块,每个扫描块中开启一个像素(ON像素)并按图6(b)所示虚线逐行逐点依次扫描,ON像素发出的光由透镜L1准直,然后通过偏振分束器(PBS)和四分之一波片(QWP),最后通过色散物镜成像到被测物表面。由于透镜L1和物镜的色差,不同波长的光聚焦在不同的深度。来自样品的反射光首先被物镜收集,然后再次通过QWP到达PBS。

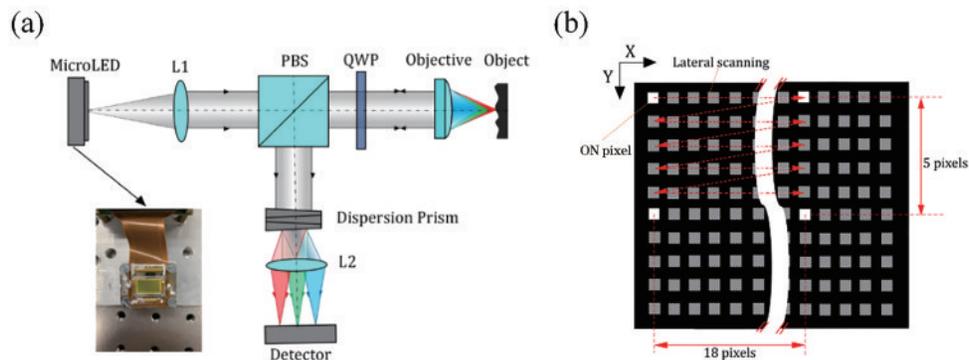


图6 基于microLED的光谱共聚焦显微镜实验设置及扫描模式^[37]。(a)实验设置;(b) microLED阵列的扫描模式示意图

Fig. 6 Experimental setup and scanning pattern for the microLED-based chromatic confocal microscope^[37]. (a) Experimental setup; (b) schematic pattern of the scanning microLED array

在通过 QWP 两次后,来自物体的反射光转换为 s 偏振光并被 PBS 反射。被 PBS 反射的光经棱镜色散后由透镜 L2 聚焦到面阵探测器上,探测器将采集到反射光的光谱分布。对校准后的光谱进行解码即可获得待测点的深度信息。在整个视场内扫描 microLED 的 ON 像素,即可获取被测物的三维信息。实验结果表明, microLED 有望成为便携式 3D 光谱共焦显微镜的解决方案^[37]。

4 CCM 技术研究进展

自 1987 年,Boyd^[3]将波长位置编码原理推广到共聚焦显微镜技术后,CCM 技术不断发展完善,不断有学者从光学设计、信号产生模型、光谱数据处理^[40-46]等角度对 CCM 技术进行研究。另外,随着半导体技术、材料科学的发展,高速探测器、超连续谱光源等器件^[47-48]的出现使得 CCM 测量性能的进一步提升成为可能。

4.1 用于 CCM 的线性色散物镜设计

针对色散物镜设计,国内外学者围绕着大色散范围、高色散线性度、高成像质量的目标进行了大量研究。主流设计方案包括使用折射透镜^[49-58]、衍射透镜^[59-62]以及折衍混合透镜^[9]。2005 年,Novak 等^[63]对折射透镜增色镜的设计进行了理论研究,提出线性色散的物镜设计方程。之后,许多学者基于该方程进行色散物镜初始结构的设计^[64-68]。2022 年,Liu 等^[61]设计了一种基于菲涅耳波带片(FZP)的光谱共焦测量系统,系统结构如图 7 所示。作者对该系统进行了分辨率测试以及样品测试,实验结果表明,系统轴向测量范围超

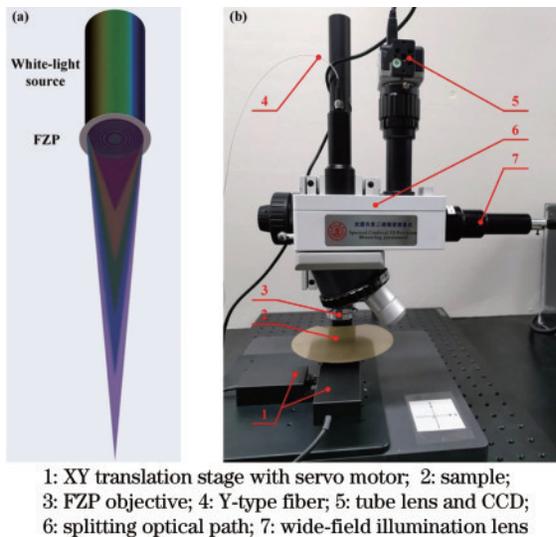


图 7 CCM 色散聚焦原理图及实验样机^[61]。(a) FZP 负色散现象示意图;(b)实验样机
Fig. 7 Schematic diagrams of dispersion focusing and experimental prototype of CCM^[61]. (a) Schematic diagram of the negative dispersion phenomenon of FZP; (b) experimental prototype

过 16 mm,轴向分辨率达到 0.8 μm ,位移测量精度优于 0.4%。

此外,也有学者围绕色散物镜探索着新的设计策略以及可能性。2017 年,崔长彩等^[69]采用色散和聚焦功能分离的思路设计了一种色散物镜,通过搭配不同的聚焦物镜,可以分别获得 1300 μm 和 225 μm 的测量范围,对应的轴向分辨率分别为 2 μm 和 0.4 μm 。2021 年,Yang 等^[70]提出了定量反色散物镜的设计模型,将控制轴向线性色散的多重结构隐含在单一结构中,统一了图像质量评价的参考平面,所设计的色散物镜的色散线性判定系数是 0.9998,线性度优异。2021 年,Zhang 等^[5]提出了按光功率分布对双胶合透镜分类的理论,将双胶合透镜分为 L 型和 S 型色散,并得出 S 型双胶合透镜适合设计数值孔径较大的物镜,而 L 型更适合设计色散范围更大的物镜的结论。

4.2 CCM 系统的信号模型

光谱信号的品质(FWHM、SNR 等参数)会直接影响光谱数据处理的难度,最终影响 CCM 系统的测量性能。CCM 光谱信号由系统的优化设计参数决定,包括照明针孔和探测针孔的尺寸、镜头光瞳直径、镜头的色散焦移特性和像差表现。光谱共焦显微镜的信号模型一直是研究人员感兴趣的话题。2012 年,武芃樾^[71]在共聚焦原理的基础上,假设光谱共焦系统具有线性的色散焦移,推导出了线性色散条件下 CCM 系统的轴向光强响应:

$$I(\lambda) = \left\{ \frac{\pi a^2}{\lambda f(\lambda)} \operatorname{sinc} \left\{ \frac{\pi a^2 [f(\lambda) - f(\lambda_0)]}{2\lambda [f(\lambda)]^2} \right\} \right\}^4 \times S(\lambda)O(\lambda)D(\lambda), \quad (3)$$

式中: a 为成像透镜的孔径; λ 为波长; λ_0 为聚焦于样品表面的波长; $f(\lambda)$ 表示波长为 λ 的光对应的焦距; $S(\lambda)$ 、 $O(\lambda)$ 、 $D(\lambda)$ 分别是光源光谱分布、被测物反射率、探测器响应度分布对轴向光强响应的的影响因子。该模型的局限性在于基于理想点光源和无限小孔径,而实际光学系统中,探测以及照明针孔均为有限小尺寸。

2014 年,Hillenbrand 等^[72]基于共聚焦显微镜的理论^[73]对 CCM 系统的光学模型进行了研究,提出考虑有限尺寸照明针孔以及探测针孔的 CCM 系统信号模型。实验结果表明,在对镜面反射目标进行测量时,所提几何模型与波动光学模型在大像差与渐晕的情况下仍能提供准确的结果,但测量漫反射目标时,模型与实验结果存在差异。2018 年,Claus 等^[74]提出一种基于标量衍射理论的光谱共焦模型,模型中考虑了表面粗糙度和波相差的影响,可以提高对漫反射表面的测量精度。

2021 年,Chen 等^[75]开发了一个二维光谱信号模型来描述彩色共聚焦显微镜中的信号强度-波长-位移特性,改进了此前的光学模型只考虑信号强度-波长,而

没有考虑波长-位移关系的缺点。同年, Nizami 等^[76]提出一种适用于多模光纤的光谱共焦信号波动光学模型, 该模型将光纤输出光建模为点源网格, 通过对探测器平面中反射场强度进行非相干求和来获得共焦信号。实验结果表明, 该模型预测结果与实验结果几乎完全吻合。

4.3 CCM 系统中的光谱信号处理

CCM 系统所探测的光谱数据需要过去除暗信号、光谱归一化处理、去除随机噪声、峰值波长提取、标定曲线拟合与插值才能得到最终的位置信息。关于 CCM 数据处理的研究, 主要集中在光谱归一化处理、峰值波长提取这两个方面。

4.3.1 光谱特性归一化

式(3)所提出的模型尽管存在一定局限, 但考虑了光源光谱分布 $S(\lambda)$ 、被测物反射率 $O(\lambda)$ 、探测器响应度分布 $D(\lambda)$ 等因素对测量光谱信号的影响, 具有一定参考意义。需要注意, $S(\lambda)$ 、 $O(\lambda)$ 、 $D(\lambda)$ 等系统实际器件产生的额外调制通常是非单调且不平滑的, 因此可能导致实际测得的反射光谱峰值波长偏离此时聚焦于

待测物表面的波长, 并且降低最终得到的峰值波长-位置特征曲线的拟合优度。因此, 在进行光谱寻峰之前需要消除实际器件额外调制的影响, 即光谱特性的归一化处理。关于光谱特性归一化的研究方案总体上可以分为两类: 1) 改变光路结构, 测量指定端口的光谱, 求解出携带额外调制信息的参考光谱; 2) 设计算法从反射光谱信号中提取参考光谱。

早期对光谱共焦系统的研究中, 学者多采用前一种方法进行光谱归一化处理。2012 年, 武芃樾^[71]采用光源光谱作为参考光谱进行归一化处理, 消除了光源光谱分布和探测器响应特性的影响, 但仍然保留了光学元件衰减特性。2016 年, 王津楠^[77]使用 2×2 光纤耦合器, 并将两输出端对接从而获取参考光谱, 该方法进一步消除了光纤衰减特性的影响。2019 年, Bai 等^[4]设计了如图 8 所示的带参考臂的光谱共焦光路结构, 并针对此系统设计了光谱特性归一化方法。图 8 中, IA 为照明臂, DA 为探测臂, RA 为参考臂, MA 为测量臂, SBF 是具有环形通光结构的空带通滤波器。光谱仪所接收到的来自参考臂和测量臂的反射光谱可描述为

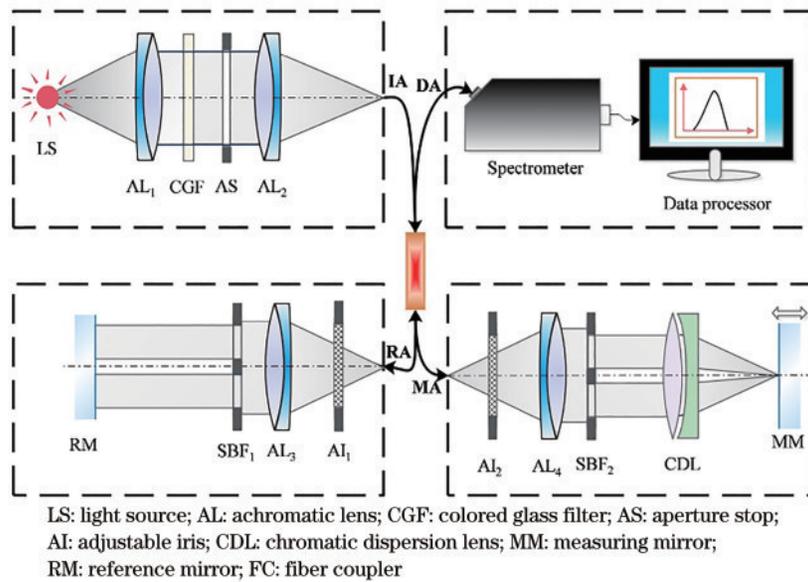


图 8 光谱共焦测量系统原理图^[4]

Fig. 8 Schematic of a chromatic confocal measurement system^[4]

$$\begin{cases} \text{RA: } I_{\text{R}}(\lambda_k) = I_0(\lambda_k) + I_{\text{N}}(\lambda_k)\psi(\lambda_k) \\ \text{MA: } I_{\text{M}}(\lambda_k) = I_0(\lambda_k) + I_{\text{N}}(\lambda_k)\psi(\lambda_k)\eta(\lambda_k) \end{cases}, \quad (4)$$

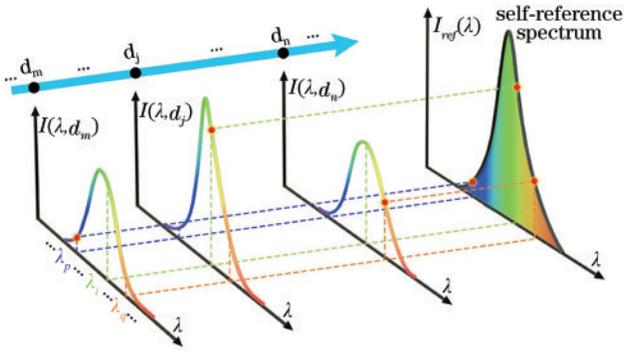
式中: λ_k 是波长; $I_{\text{R}}(\lambda_k)$ 是光谱仪检测到的来自 RA 的反射光谱; $I_{\text{M}}(\lambda_k)$ 是光谱仪检测到的来自 MA 的反射光谱; $I_0(\lambda_k)$ 表示光源直接传入 DA 的串扰光谱; $I_{\text{N}}(\lambda_k)$ 是从 RA 或 MA 出射后通过 SBF₁ 或 SBF₂ 的光谱; $\psi(\lambda_k)$ 是 RA 的反射率; $\eta(\lambda_k)$ 是色散透镜的归一化色散系数, 可表示为

$$\eta(\lambda_k) = \frac{I_{\text{M}}(\lambda_k) - I_0(\lambda_k)}{I_{\text{R}}(\lambda_k) - I_0(\lambda_k)}. \quad (5)$$

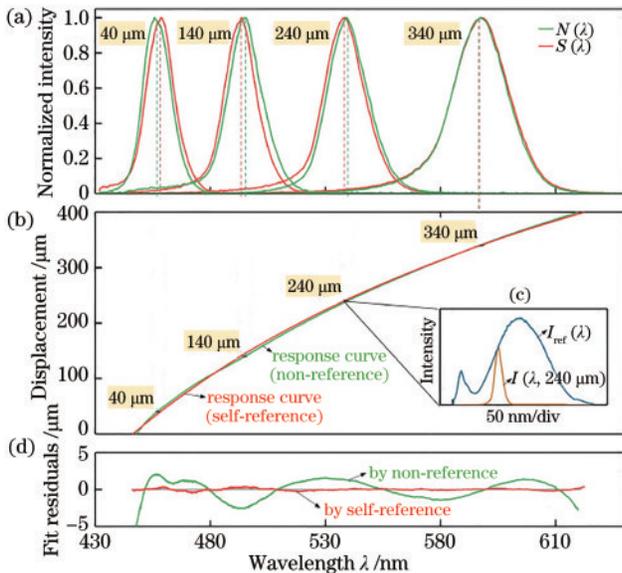
2021 年, Bai 等^[44]提出自参考色散校正的光谱特

性归一化方法, 无需改动系统结构, 而是从预先测得的不同位置光谱数据中提取参考光谱。图 9 展示了获取自参考光谱的原理。任取 3 个波长 ($\lambda_k, \lambda_i, \lambda_q$), 假设 3 种单色光的轴向强度响应分别在位置 (d_m, d_j, d_n) 处取最大值, $I(\lambda, d_m)$ 、 $I(\lambda, d_j)$ 、 $I(\lambda, d_n)$ 分别表示待测表面在 d_m, d_j, d_n 处时系统测得的反射光谱。自参考光谱 $I_{\text{ref}}(\lambda)$ 中每个波长的强度取其所能达到的最大强度, 则 $I_{\text{ref}}(\lambda_p) = I(\lambda_p, d_m)$, $I_{\text{ref}}(\lambda_i) = I(\lambda_i, d_j)$, $I_{\text{ref}}(\lambda_q) = I(\lambda_q, d_n)$, 推广到所有波长, 则 $I_{\text{ref}}(\lambda)$ 具有如下形式:

$$I_{\text{ref}}(\lambda) = \left\{ \dots, \max [I(\lambda_p, d)], \dots, \max [I(\lambda_i, d)], \dots, \max [I(\lambda_q, d)], \dots \right\}. \quad (6)$$

图 9 通过预扫描的自参考校正策略^[44]Fig. 9 Prior self-reference strategy by pre-scanning progress^[44]

作者将自参考光谱归一化方法与传统的非自参考光谱归一化结果进行了对比,结果如图 10 所示。图 10(a)绘制了 4 个不同位置处测得的归一化反射光谱,可以看出,两种方法处理得到的归一化反射光谱峰值位置不相等。图 10(b)表明,两种归一化方法得到的峰值波长-位置响应曲线在大部分位置分离。图 10(c)为两种方法得到的响应曲线的 5 阶多项式拟合残差,可以看出,自参考光谱校正策略提高了拟合优度。

图 10 自参考校正策略的测量流程图^[44]Fig. 10 Measurement flowchart with the prior self-reference strategy^[44]

4.3.2 峰值波长提取

峰值波长提取是 CCM 数据处理中另一个关键问题,CCM 系统中常用的寻峰算法主要可分为质心法、拟合法等。不少学者在质心法基础上提出新的算法,另外也有学者提出新的算法,比如基于 mean-shift 理论的寻峰算法^[42]、修正拟合微分算法^[41]等。质心法具有计算简单、方便的特点,对处理对称分布的信号效果较好,其表达式为

$$x = \frac{\sum_{n=1}^n n I_n}{\sum_{n=1}^n I_n}, \quad (7)$$

式中: x 为质心位置; n 为 CCD 像素序号; I_n 为第 n 个像素对应的灰度值。

在质心法的基础上衍生出不少改进算法,如平方加权质心法和阈值质心法等。平方加权质心法将灰度值的平方作为权重,相比质心法更加突出了峰值附近像素对寻峰结果的影响,公式如下:

$$x = \frac{\sum_{n=1}^n n I_n^2}{\sum_{n=1}^n I_n^2}. \quad (8)$$

阈值质心法将原数据与阈值相减,然后对相减后的数据使用质心法,优势在于避免了受噪声影响较大的低灰度值数据对寻峰结果的影响,缺点在于阈值 T 的取值依赖于多次实验的经验。阈值质心法公式如下:

$$x = \frac{\sum_{n=1}^n n (I_n - T)}{\sum_{n=1}^n (I_n - T)}. \quad (9)$$

光谱数据处理中,高斯拟合是较常见的拟合方法^[29, 42, 46, 78-79],此外还有抛物线拟合^[42]等。高斯拟合准确率较高,但拟合计算过程计算量较大、耗时较多。高斯函数表达式如下:

$$f(x) = A_0 \exp\left[-\frac{(x-b)^2}{2c^2}\right], \quad (10)$$

式中: A_0 为振幅; b 为样本期望; c 为样本方差。

2019 年, Bai 等^[40]提出一种改进的质心寻峰算法,在阈值质心法前先对光谱数据进行密度插值。作者从实验上对算法的稳定性进行了研究,图 11 展示了质心法和不同插值密度的改进质心算法的寻峰结果波动情况。在对固定位置样品的连续 200 次反射光谱进行寻峰求解时,质心法、插值密度为 5 和 9 的改进质心算法的波动范围分别为 0.059 nm、0.050 nm、0.047 nm,标准差分别为 0.01 nm、0.0091 nm、0.0089 nm,这说明改进的质心法可以抑制波动、提高测量分辨率和稳定性。

华中科技大学的 Chen 等^[41]提出一种精度高、计算效率高的修正拟合微分算法(CFDA),峰值提取精度与高斯拟合算法相当,但时间成本仅为百分之一。同年,朱鸿^[42]提出一种基于 mean-shift 理论的峰值波长提取算法(MS 迭代算法),算法原理如图 12 所示。 $m_{h,c}(\lambda_0)$ 为迭代函数,表达式如式(11)所示, $m_{h,c}(\lambda_0) - \lambda_0$ 即 mean-shift 向量, λ_0 为质心法得到的初始值, ϵ 为允许误差,当 mean-shift 向量长度小于允许误差时,认为 $m_{h,c}(\lambda_0)$ 满足精度。另外作者对比了 MS 迭代算法与质心法、高斯拟合法、抛物线拟合法的性能表现,结果如

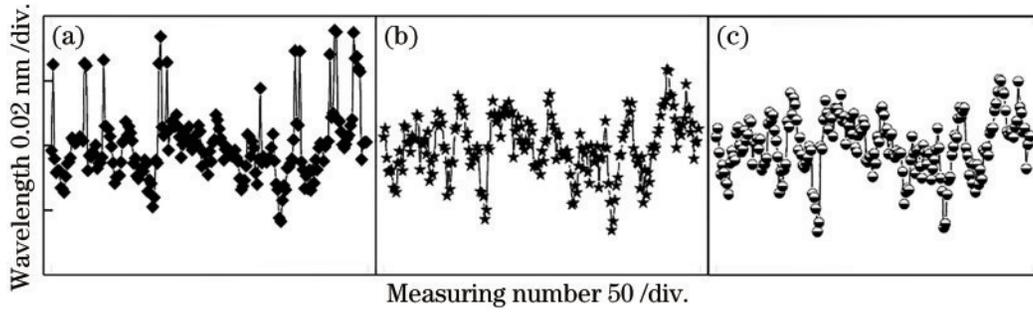


图 11 不同算法寻峰结果波动情况^[40]。(a)质心法；(b)插值密度 5 的改进质心法；(c)插值密度 9 的改进质心法。

Fig. 11 Fluctuation of peak finding results of different algorithms^[40]. (a) Centroid method; (b) modified centroid method by the interpolation density of 5; (c) modified centroid method by the interpolation density of 9

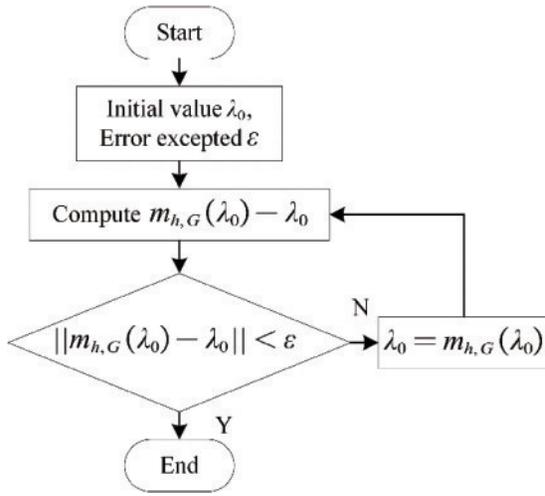


图 12 Mean-shift 迭代算法流程图

Fig. 12 Flowchart of mean-shift iterative algorithm

表 1 所示,结果证明 MS 迭代算法实现了与高斯拟合法精度相当的测量,且效率提升了 73 倍。

$$\left\{ \begin{array}{l} G(\lambda) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{1}{2}\|\lambda\|^2\right) \\ \omega(\lambda) = [I(\lambda)]^2 \\ h = \left(\frac{4}{3n}\right)^{1/5} \sigma \\ m_{h,G}(\lambda_0) = \frac{\sum_{i=1}^n \lambda_i G\left(\frac{\lambda_i - x_0}{h}\right) \omega(\lambda_i)}{\sum_{i=1}^n G\left(\frac{\lambda_i - x_0}{h}\right) \omega(\lambda_i)} \end{array} \right., \quad (11)$$

式中： λ_0 为初值； σ 为波长的样本方差； λ_i 为 CCD 第 i 个像素对应的波长； n 为像素总数， h 为核半径； $G(\lambda)$ 为高斯核函数； $\omega(\lambda)$ 为权函数； $I(\lambda)$ 为波长为 λ 的光强。

4.4 虚拟针孔技术在 CCM 系统中的应用

CCM 作为一种光学显微成像技术,如何获取高分辨、高信噪比的图像一直是一个重要的研究方向。虚拟针孔技术可以减少离焦光,从而提高 CCM 的轴向分辨率。具体做法是对探测器中选定的像素

表 1 不同寻峰算法的性能对比^[42]

Table 1 Performance comparison of different peak extraction algorithms^[42]

| Peak extraction algorithm | Accuracy / % | Precision / % | Elapsed time / ms |
|---------------------------|--------------|---------------|-------------------|
| Centroid peak extraction | 0.4276 | 1.3968 | 0.0064 |
| Parabola fitting | 0.1626 | 0.8139 | 0.5021 |
| Gauss fitting | 0.0113 | 0.8001 | 6.0817 |
| MS iteration | 0.0979 | 0.8096 | 0.0972 |

探测到的光强进行数值积分,从而对针孔信号进行估计^[80]。

2021 年,哈尔滨工业大学的张志强^[81]进行了基于虚拟狭缝的共焦线扫描测量方法研究,探测原理如图 13(b)所示。样品表面反射回来的信号光直接被探测器接收,面阵 CCD 上的每一个像素可看作一个针孔,通过数字控制的方法选取像素数量从而灵活改变针孔大小。同时对一系列像素进行采集,即为虚拟狭缝探测。仿真分析表明:在 $A_{NA}=0.5$ 、 $\lambda=532$ nm、像元尺寸为 $4.65 \mu\text{m}$ 时,基于虚拟狭缝的线共焦测量分辨力可达 $0.46 \mu\text{m}$,克服了传统物理狭缝引起的轴向和横向分辨力下降的问题。

Li 等^[37]报道了一种使用 microLED 的具有虚拟共焦针孔的光谱共焦显微镜,在 $430\sim 490$ nm 范围内,实现 $84.4 \mu\text{m}$ 的色焦移。系统以 microLED 作为点光源阵列进行横向扫描,利用物镜色差进行轴向扫描,虚拟针孔技术的引入提高了深度重建的对比度和精度,使用该系统对 $8 \mu\text{m}$ 高的铜制台阶样品进行了测量,测量结果为 $8.025 \mu\text{m}$,标准偏差为 $0.055 \mu\text{m}$,结果如图 14 所示。另外对洋葱上表皮细胞进行了成像,结果如图 15 所示。

4.5 CCM 系统中串扰的解决方案

串扰问题主要是由光的衍射引起的,它会降低光谱分析系统的光学分辨率,从而引起光谱共焦显微镜的轴向分辨率的下降^[82-83]。针对如何减小 CCM 系统串扰,不少学者分别从光纤芯径^[84]、扫描方案^[33]、反卷积算法^[18]等方面展开了研究。

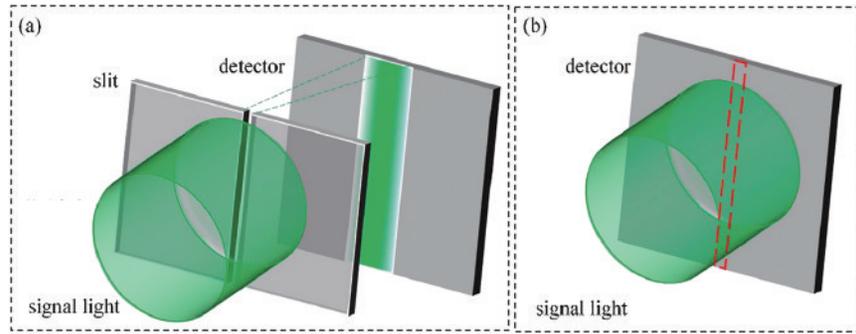


图 13 物理狭缝和虚拟狭缝探测示意图^[81]。(a)物理狭缝;(b)虚拟狭缝

Fig. 13 Schematic of physical slit and virtual slit detection^[81]. (a) Physical slit; (b) virtual slit

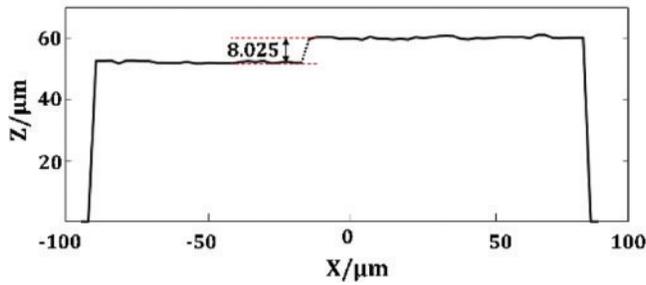


图 14 8 μm 台阶样品的截面轮廓图^[37]

Fig. 14 Cross-sectional surface profile of the 8 μm step sample^[37]

2011年,Chen等^[84]采用共轭的图像传输光纤阵列搭建线扫描光谱共焦系统,作者对光纤芯径、间距等因素对串扰的影响进行了研究。图16展示了文献[84]中所搭建的线扫描光谱共焦传感器,该系统使用一对线性排列的图像传输光纤阵列,并与多波长狭缝集成从而最小化信号串扰效应。图17(a)展示了共轭的光纤阵列,每根光纤独立地传输不同位置处的入射光,并实现入射光与其对应的探测物点之间一对一的共轭关系。图17(b)展示了优化的光纤芯径和间距,离焦光和其他杂散光将被光纤芯径过滤掉,而优化的光纤间距则使得串扰效应最小化。

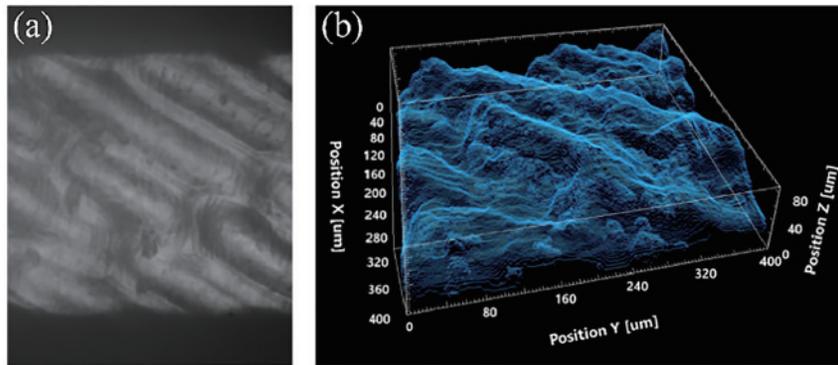


图 15 重建的洋葱表皮三维图像和体积图像^[37]。(a)三维图像;(b)体积图像

Fig. 15 Reconstructed 3D image of an onion epidermis and its volume image^[37]. (a) 3D image; (b) volume image

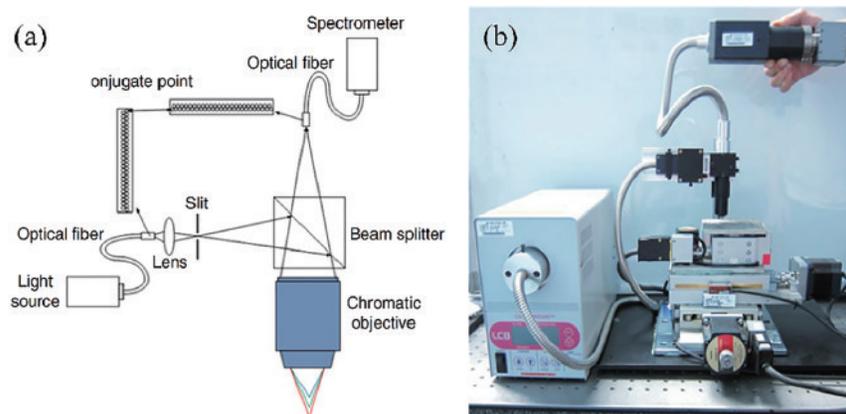


图 16 线扫描彩色共聚焦显微镜原理图^[84]。(a)光学结构和(b)原型系统

Fig. 16 Schematic diagrams of line-scanned chromatic confocal microscope^[84]. (a) Optical configuration; (b) prototype system

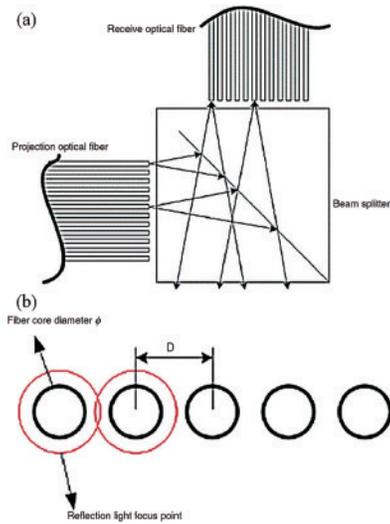


图 17 空间匹配图像光纤对示意图^[84]。(a) 光纤对的光学结构；
(b) 纤芯直径和间距的优化设计
Fig. 17 Schematic diagrams of the spatially matching image fiber pairs^[84]. (a) Optical configuration of fiber pairs; (b) optimal design of the fiber core diameter and fiber pitch

2012 年, Chen 等^[33]采用数字微镜设备搭建全场光谱共焦表面轮廓测量仪从而减小横向串扰。具体方法

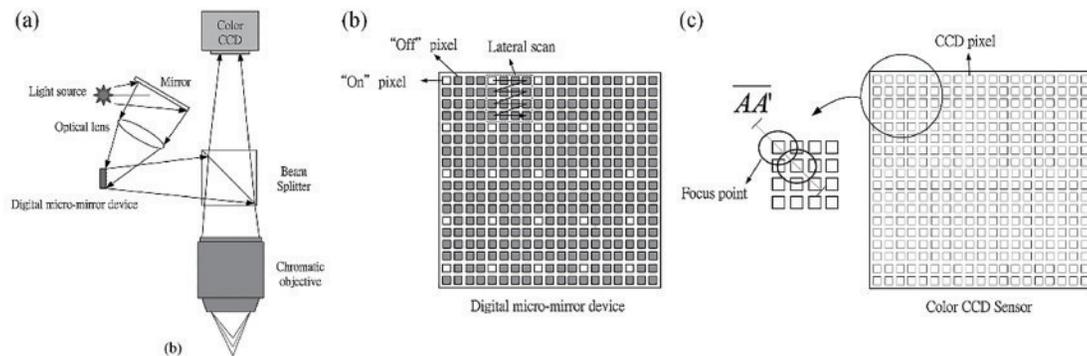


图 18 光学系统配置^[33]。(a) 基于 DMD 的光谱共焦显微系统；(b) DMD 投影模式；(c) 对应的 CCD 传感器
Fig. 18 Optical system configuration^[33]: (a) DMD-based chromatic confocal microscopic system; (b) DMD projection mode; (c) corresponding CCD sensors

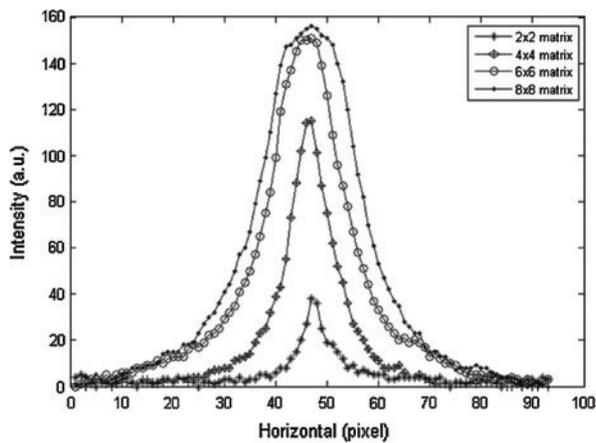


图 19 使用 4 种扫描模式分别得到的光强分布曲线^[33]
Fig. 19 Light intensity distribution obtained using four different projecting spot sizes^[33]

是使 DMD 上的每个微镜都与其对应的入射光及检测点具有一对一的共轭关系。DMD 在空间上过滤离焦光和其他杂散光,使其远离对应的探测像元,从而使传感器像元间的横向串扰最小化。图 18 分别展示了文献^[33]所提出的系统结构、DMD 的扫描模式以及对应的 CCD 采集到的光斑。采用这种系统设置以及扫描策略,深度响应曲线的半峰全宽(FWHM)明显减小,从而提高轴向测量的分辨率和可重复性。图 19 展示了 DMD 采用不同扫描模式时 CCD 一行像素接收到的光强分布曲线,其中,2 pixel×2 pixel 的扫描模式具有最小的 FWHM。实验结果表明,高度测量的 $\pm 3\sigma$ 重复性可以在整个测量范围内小于 2%,从而提高了深度检测的垂直测量分辨率和重复性。

2013 年, Chen 等^[18]提出一种反卷积方法来解决线扫描光谱共焦表面轮廓测量中的横向和轴向串扰问题。该策略将光谱共焦原理和反卷积理论相结合,解决了显微共焦测量中的串扰问题,使线扫描系统分辨率达到传统点扫描系统的分辨率水平。图 20 展示了反卷积处理前后的光谱信号对比以及不同迭代次数后光谱信号的 FWHM。可以看出,经过 6 次迭代后 FWHM 从 26.1 nm 减小到 0.9 nm。

5 CCM 应用研究

CCM 技术是一种高分辨、非侵入、高信噪比、高速测量的层析成像技术,在生物医学成像、光学厚度测量、表面形貌测量、生产加工在线监测等领域被广泛研究和应用。

5.1 CCM 在生物医学成像中的应用

共聚焦显微镜自产生以来就被广泛应用于生物医学成像中。迄今为止,人们已经开发了多种共焦内窥镜设备,并成功地应用到人体组织成像中,包括口腔粘膜^[85-87]、卵巢组织^[88]、结肠粘膜^[89]、食管组织^[90]和胶质瘤组织^[91]。早期的内窥镜技术难以同时实现高分辨率和大成像深度,严重阻碍了疾病的早期诊断。光谱共焦显微术利用色散焦移将不同波长聚焦到不同的深度,

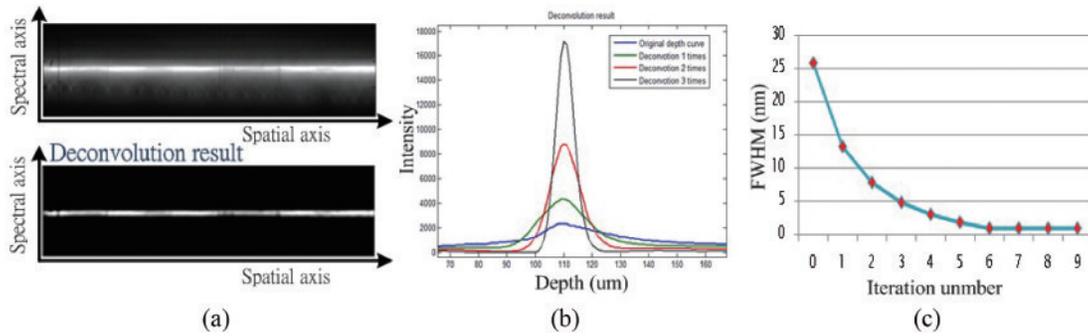


图 20 实验结果^[18]。(a)原始频谱信号与一次去卷积后的处理信号的比较(上为原始卷积,下为处理后的卷积);(b)不同迭代次数获得的深度响应曲线;(c)迭代次数与深度响应曲线 FWHM 的关系

Fig. 20 Experimental results^[18]. (a) Comparison between the original spectrum signal and the processed signal after one-time deconvolution (the above is the original one while the bottom is the processed one); (b) depth response curves obtained by different number of iterations; (c) relationship between iteration number and FWHM of depth response curve

相比共聚焦显微镜成像深度更大、成像速度更快。基于光谱共焦的内窥镜技术凭借大成像深度、高速测量、无标记检测的优点,在疾病诊断中具有巨大的潜力。

Olsovsky 等^[92]利用超连续光源、非球面透镜以及光谱仪搭建了光谱共焦显微镜,并对猪口腔上皮细胞进行成像,这种彩色共焦显微镜在成像深度约 150 μm 的范围内获得了 3 μm 的轴向分辨率,具备细胞级成像能力。图 21 和图 22 为用光谱共焦显微镜和商用共聚

焦显微镜对猪口腔上皮细胞成像的结果,二者获得的结果接近。传统的共聚焦显微镜需要对样品或物镜进行轴向移动以获取深度数据,而 Olsovsky 等所搭建的 CCM 可在单次拍摄中捕获 157 μm 深度范围的深度数据。

Kulkarni 等^[27]开发了一种低成本的彩色共焦内窥镜(CCE),CCE 以细胞级分辨能力对组织横截面进行成像,图 23 为系统原理图。搭建的 CCE 原型机在 100 μm 的成像深度内实现了 2 μm 的横向分辨率和 4 μm 的轴向分辨率。在体内组织成像过程中,由于信号强度低,CMOS 传感器的曝光时间增加,相应的成像速度为 4 frame/s。使用 CCE 和便携式共聚焦显微镜获得的人手指在体内的共聚焦图像如图 24 所示。在 CCE 获取的图像中[图 24(a)],角质化表皮细胞表现为“星状”,和便携式共聚焦显微镜观察到的图像类似[图 24(b)、(c)]。使用 CCE 和便携式共聚焦显微镜获得的人体下唇在体内的共聚焦图像如图 25 所示。在图 25(a)中,鳞状上皮细胞核清晰可见,其大小和密度与图 25(b)便携式共聚焦显微镜获取的图像相似。这一结果表明 CCE 具有可视化宫颈上皮细胞核的潜力,有望帮助中低收入国家准确诊断和及时治疗宫颈的恶性肿瘤。

5.2 CCM 在三维形貌测量的应用

点式光谱共焦系统利用物镜的轴向色散,在轴上形成多个焦点,从而对轴上多个点进行同时测量,因此适合于透明样品的厚度测量,如薄膜厚度测量^[93-95]。对于具有旋转对称特性的样品,结合转台可以进行圆度测量^[96-97]。点式 CCM 结合位移台、振镜等装置进行横向扫描,可以实现对多层样品的三维形貌测量以及测量样品的表面粗糙度信息^[98]。

清华大学团队^[94]提出一种改进的光谱共焦传感器。系统结构以及色散探针原理图如图 26 所示,在色散探针中安装环形光阑来保持入射光的入射角恒定以此来提高测量精度。另外,使用自参考光谱归一化的

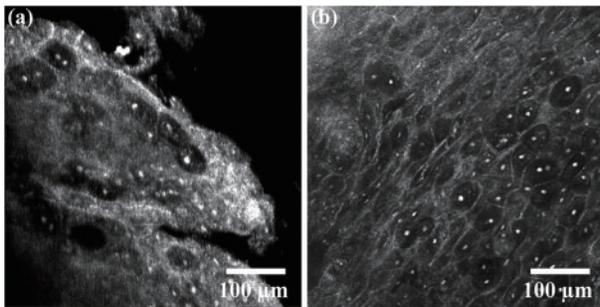


图 21 组织 1^[92]。(a)猪颊粘膜的 CCM 图像;(b)来自 Lucid Vivascope 共聚焦显微镜的相同组织图像

Fig. 21 Media 1^[92]. (a) CCM image of porcine buccal mucosa; (b) an image of the same tissue from the Lucid Vivascope confocal microscope

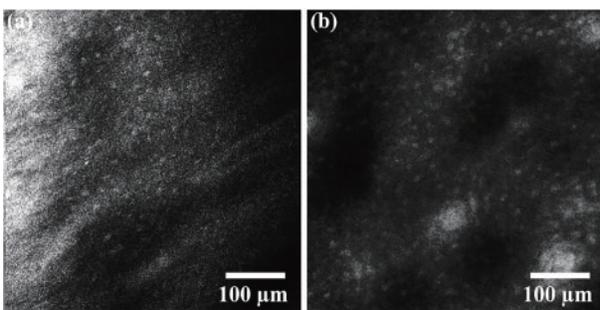
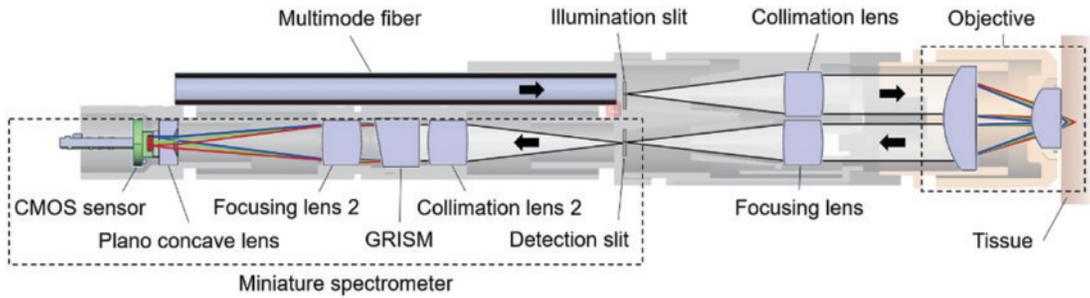
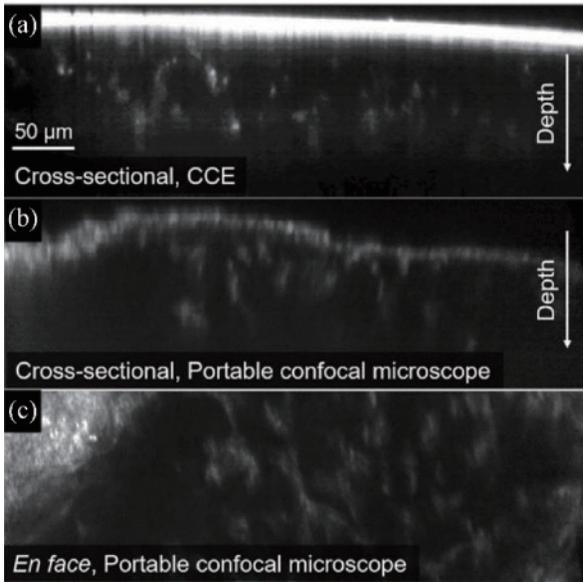
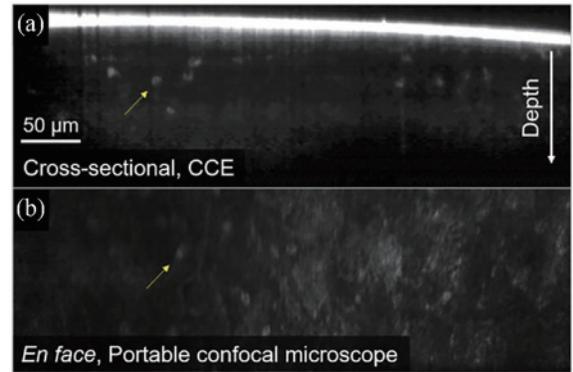
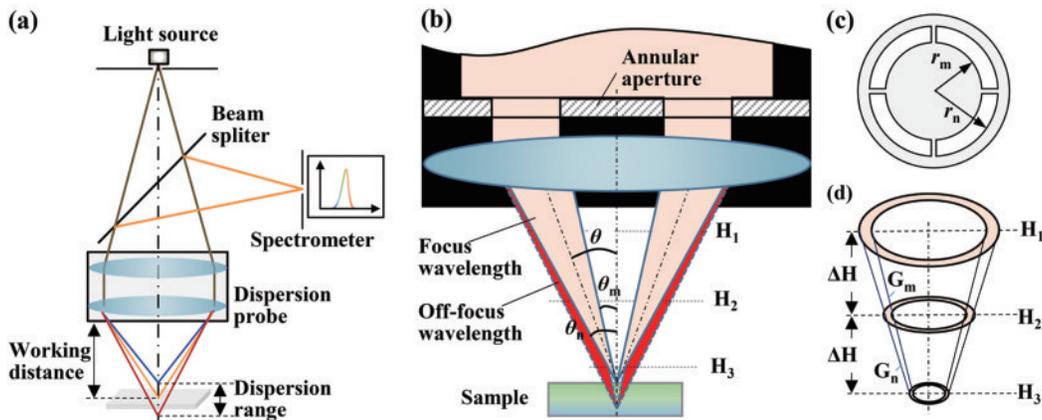


图 22 组织 2^[92]。(a)猪颊粘膜的 CCM 图像;(b)来自 Lucid Vivascope 共聚焦显微镜的相同组织图像

Fig. 22 Media 2^[92]. (a) CCM image of porcine buccal mucosa; (b) an image of the same tissue from the Lucid Vivascope confocal microscope

图 23 光谱共焦内窥镜原理图^[27]Fig. 23 Schematic of chromatic confocal endoscope^[27]图 24 人类手指体内共焦图像对比^[27]。(a)用 CCE 获取的人类手指体内共焦图像；(b)(c)用便携共聚焦显微镜获取的人类手指体内横截面和正面共焦图像Fig. 24 Comparison of confocal images in human fingers^[27]. (a) Confocal images of human fingers obtained by CCE; (b)(c) cross-sectional and frontal confocal images of human fingers obtained with a portable confocal microscope图 25 人体下唇体内截面共焦图像^[27]。(a)用 CCE 获取的人体下唇体内截面共焦图像；(b)用便携共聚焦显微镜获取的人体下唇体内正面共焦图像Fig. 25 Cross-section confocal images of human lower lip^[27]. (a) Confocal image of human lower lip internal section obtained by CCE; (b) Frontal confocal image of human lower lip obtained by portable confocal microscope

方法确定样品表面反射光的归一化色散系数。作者用该光谱共焦传感器对二氧化硅薄膜厚度进行了测量，图 27 展示了薄膜样品的测量结果，并和椭偏仪以及商用薄膜测厚仪所测结果进行了对比，结果如表 2 所示。实验结果表明，光谱共焦传感器与商用薄膜测厚仪和

图 26 系统结构以及色散探针原理图^[94]。(a)光谱共焦系统原理图；(b)色散探针原理图；(c)环形光阑结构；(d)近似固定入射角的探测光束Fig. 26 System structure and dispersion probe schematic diagram^[94]. (a) Schematic of the chromatic confocal system; (b) schematic of the dispersion probe; (c) structure of the annular aperture; (d) the beam of approximately fixed angle of incidence

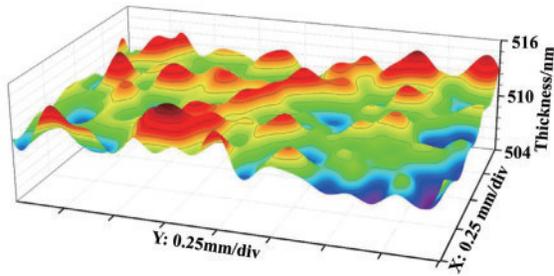
图 27 薄膜 3 的三维厚度形貌^[94]

Fig. 27 Three-dimensional thickness topography of film 3^[94]

椭圆偏仪测量值的平均差值小于 1.9 nm, 系统的测量重复性在约 0.6 nm 以内。该工作证明了光谱共焦传感器应用于薄膜厚度测量的可靠性。

Lane 等^[99]开发了一种光谱共焦显微内窥镜, 采用两个梯度折射率 (GRIN) 透镜在 200 nm 的波长范围实

表 2 不同设备测得的厚度^[94]Table 2 Thickness measurements of different instruments^[94]

| Film No. | Thickness /nm | | |
|----------|---------------------|----------------|-----------------------|
| | Ellipsometer M-2000 | Filmetrics F20 | Self-reference method |
| Film 1 | 93.56 | 91.88 | 91.92 |
| Film 2 | 299.34 | 300.10 | 299.99 |
| Film 3 | 508.25 | 510.23 | 509.82 |

现 40 μm 的测量范围。用该光谱共焦显微内窥镜对微处理器芯片进行图像采集, 并采用 Sheppard 等^[100]提出的信号增强技术对图像进行了处理, 结果如图 28 所示。图 28(a)、(d) 表明, 系统具备 360 lp/mm 的横向分辨率 (约 1.4 μm), 图 28(d)~(f) 为信号增强后的结果, 结果表明, 信号增强并不会影响横向分辨率。该工作证明了利用 GRIN 透镜的色差实现光谱共焦显微内窥镜的可行性。

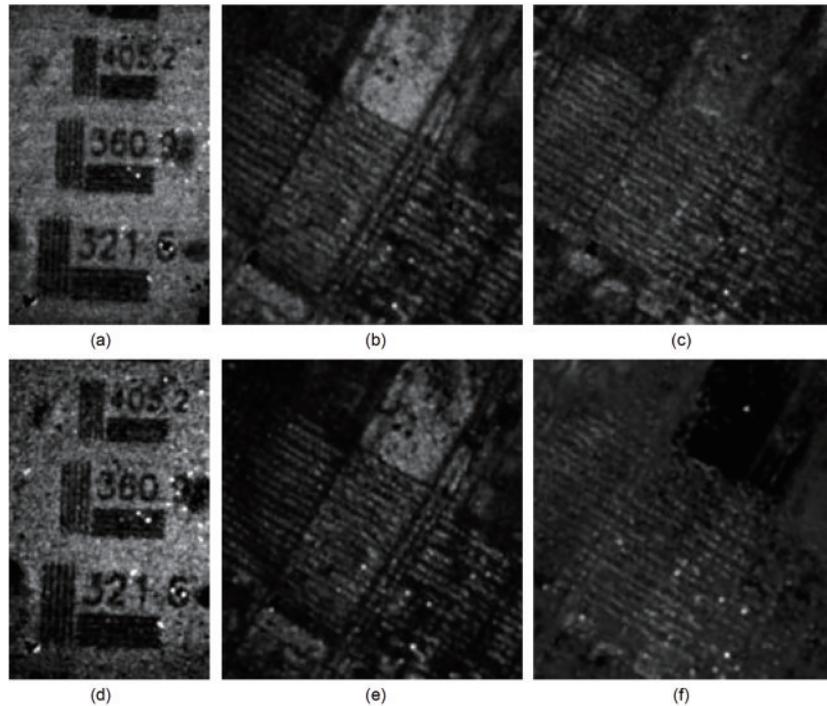


图 28 实验系统获得的共焦图像^[99]。(a) 标准分辨率目标; (b) 微处理器芯片的光学部分; (c) 在不同水平获得的同一晶片的光学部分; (d)~(f) 与正上方相同, 但图像的光学切片强度有所增强

Fig. 28 Confocal images acquired with the experimental system^[99]. (a) Standard resolution target; (b) optical section of a microprocessor chip; (c) optical section of the same chip acquired at a different level; (d)~(f) identical to those directly above, however, the optical sectioning strength of the images has been enhanced

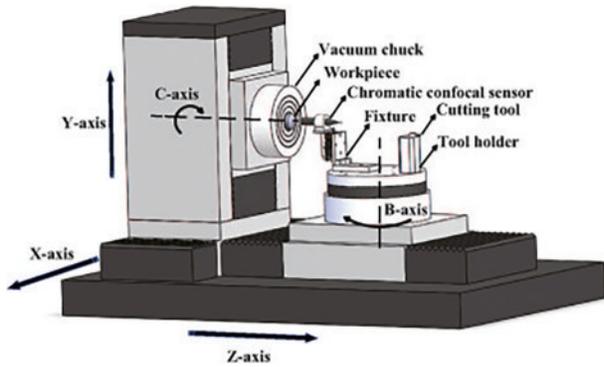
5.3 CCM 在生产加工监测中的应用

在精密生产加工中, 通常需要通过在线监测并实时补偿从而提高生产加工的精度。CCM 由于具有高分辨率、高测量速度、无损检测的优点, 非常适合于生产加工的在线监测, 例如精密机床实时监测^[101-103]、激光加工在线距离测量^[104]、生产线末端实时监测^[105]等。

2022 年, Chen 等^[101]开发了一种基于光谱共焦传感器的机床上测量装置, 系统结构如图 29 所示。利用该测量方法对球面和自由曲面样品进行了测量, 以 3D

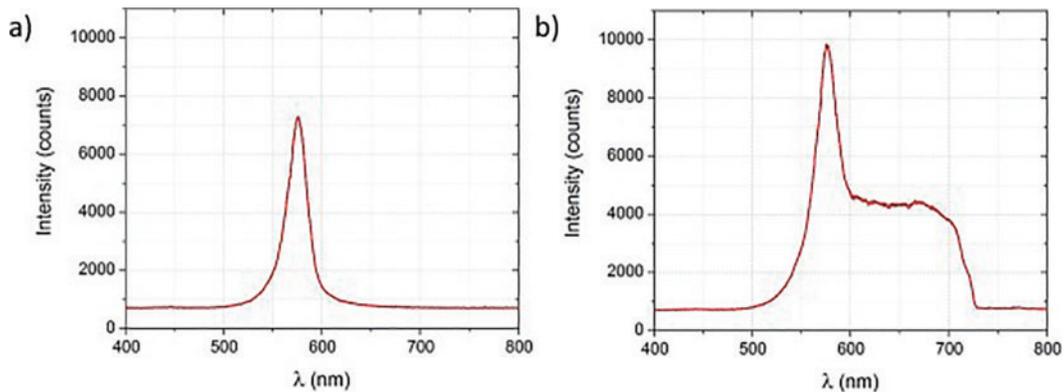
接触式轮廓仪测量结果为参考值, 对系统测量误差进行了评估, 表 3 显示了两种测量机制的误差均方根 (RMS) 和极值 (PV)。结果显示, 两种测量机制对于球面和自由曲面的 RMS 偏差均小于 0.2 μm , PV 偏差小于 0.4 μm , 满足超精密加工的精度要求。

2020 年, Zakrzewski 等^[106]设计了一种集成于激光加工头的光谱共焦位移传感器, 用于检测机构加工头与加工材料之间的距离, 系统结构如图 30 所示。作者通过仿真和实验对测量光束的功率要求和反射光谱特

图 29 机上测量系统的结构配置^[101]Fig. 29 Structural configuration of the on-machine measurement system^[101]表 3 在线和离线测量的误差表现^[101]Table 3 Form error parameters of the on-machine and offline measurements^[101] unit: μm

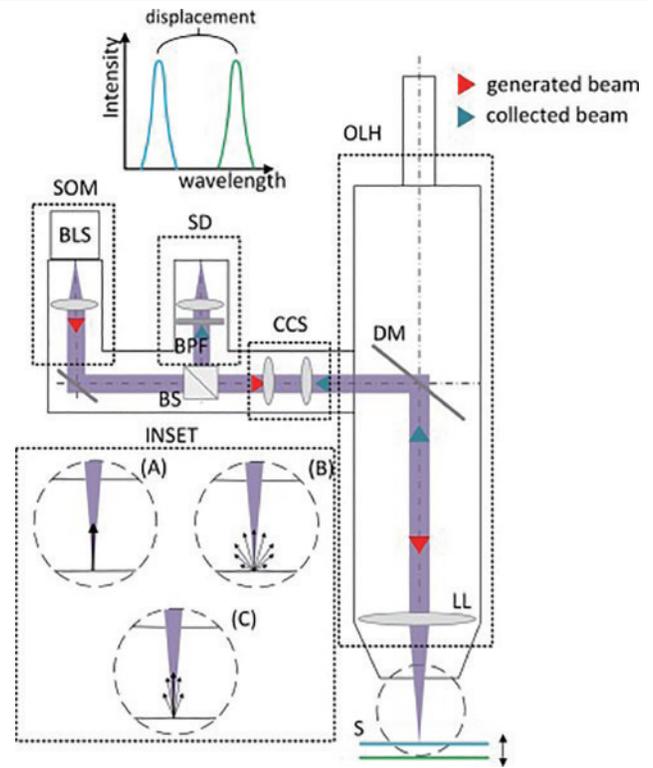
| Sample | Parameter | On-machine measurement | Offline measurement | Deviation |
|-------------------|-----------|------------------------|---------------------|-----------|
| Spherical surface | RMS | 1.4930 | 1.320 | 0.1730 |
| | PV | 5.2480 | 4.886 | 0.3620 |
| Freeform surface | RMS | 0.2096 | 0.0621 | 0.1475 |
| | PV | 0.8839 | 0.5319 | 0.3520 |

性进行了研究^[104],研究了在线和离线两种测量机制,并分析了样品反射、激光加工辐射等因素对测量结果的影响。图 31 为在在线和离线情况下探测器测得的光谱信号,即使是在线测量情况下[图 31(b)],光谱特

图 31 在两种状态下探测器获取的光谱数据^[104]。(a) 离线状态;(b) 在线状态Fig. 31 The spectral data acquired by the detector in two states^[104]. (a) The offline regime; (b) the online regime

6 总结和展望

从光谱共焦显微成像技术的分类、关键技术研究进展以及应用场景等 3 个角度出发,对 CCM 技术展开了综述。采用 CCM 技术进行三维成像的 3 种方法中:点扫描方案起源最早,应用也最成熟,具有高横向和轴向分辨率的特点,但存在扫描速度较慢以及图像畸变的问题;传统的单轴式线扫描方案使扫描速度得到提升;而双轴式线扫描方案采用共焦 θ 显微镜的结构降低了

图 30 光学系统工作原理示意图^[104]Fig. 30 Schematic presentation of the principle of operation of the optical system^[104]

征峰仍可以与激光加工产生的辐射区分开。实验结果表明,两种测量机制下,信号光的峰值波长相同,该系统适用于激光加工的在线距离测量。

横向分辨率对光学设计的要求。另外,双轴式线扫描方案的分辨率、SNR、光通量等性能参数均优于传统的单轴式系统;基于针孔阵列、微透镜阵列等技术的面阵探测方案将 CCM 技术的成像速度进一步提升,然而较低的光能利用率、更为严重的串扰问题是限制其应用的一个缺点。MicroLED 凭借像元尺寸小、独立控制发光、高速的优点有望成为 CCM 面阵探测的解决方案。

CCM 技术基于色散焦移原理,物镜的光学设计将直接影响 CCM 的分辨率、测量范围等性能参数。目

前 CCM 的物镜设计方案包括折射透镜、衍射透镜以及折衍混合透镜。衍射透镜具有较好的线性色散特性,但透射率和像差表现较差。因此,商用传感器多采用折衍混合方案,利用衍射透镜提供色差,同时利用折射透镜优化像差。CCM 的信号模型研究可以对光学设计进行指导。早期的信号模型对于镜面反射样品吻合较好,但对于漫反射样品存在差异。后续的信号模型中陆续加入了样品表面粗糙度、物镜的色散焦移特性等影响因素,使得信号模型对各种表面的适应性进一步提升。CCM 光谱数据处理中的两个关键问题是光谱特性归一化和峰值波长提取。光谱特性归一化的目的是消除其他器件对信号光谱峰的调制,自参考光归一化的方法通过预先扫描来提取参考光谱,相比传统方法无需对硬件进行改动,并且处理后的数据具有更高的拟合优度。目前 CCM 主流的寻峰算法中,改进的质心法相比质心法具有更高的稳定性并且兼具较快的运算速度,高斯拟合法虽然精度高但是运算速度较慢,mean-shift 迭代算法在与高斯拟合精度相当的同时运算速度更优。另外,基于虚拟针孔的串扰解决方案,将 CCM 的测量性能进一步提升。

CCM 技术发展至今,凭借高分辨率、大成像深度、高速处理、无损检测等优势逐步在生物医学成像、三维形貌检测、生产加工在线监测等领域得到应用。大成像深度、高速测量、无标记检测的优点使得基于光谱共焦的内窥镜在疾病诊断得到应用。无损检测、层析成像的优点使得 CCM 非常适合膜厚测量;高速测量、非接触式检测的特点使得 CCM 在工件的三维形貌测量以及生产加工的在线监测中发挥重要作用。

未来,CCM 技术仍具有广阔的发展空间。限制 CCM 系统精度的两个根本因素在于光源光谱稳定性和探测器的暗电流噪声,因此研制光谱稳定性更强的光源和噪声水平更低的探测器是提高 CCM 系统精度的一个重要研究方向。其次,根据现有对 CCM 信号模型的研究可知,CCM 的光谱信号为非对称分布,因此改进质心算法、高斯拟合法等寻峰算法均存在误差。根据 CCM 信号模型的数学形式研究出更准确的寻峰算法也是提升测量精度的关键途径。在已有的三维成像方案中,点扫描、线扫描、面阵探测均已出现了商用传感器,由于离轴像差以及横向串扰的影响,线扫描与面阵探测系统的横向分辨率往往不如点式系统。针对大视场的 CCM 系统的光学设计研究以及串扰的解决方案研究,是 CCM 能够实现大视场实时成像的关键研究内容。另外,CCM 系统精度会受到光源光谱不稳定性影响,通过引入偏振信息以及结合干涉测量技术有望抑制光源光谱不稳定性带来的噪声,可以为 CCM 技术带来创新。

参 考 文 献

[1] Courtney-Pratt J S, Gregory R L. Microscope with

enhanced depth of field and 3-D capability[J]. Applied Optics, 1973, 12(10): 2509-2519.

- [2] Molesini G, Pedrini G, Poggi P, et al. Focus-wavelength encoded optical profilometer[J]. Optics Communications, 1984, 49(4): 229-233.
- [3] Boyde A. Colour-coded stereo images from the tandem scanning reflected light microscope (TSRLM)[J]. Journal of Microscopy, 1987, 146(2): 137-142.
- [4] Bai J, Li X H, Zhou Q, et al. Improved chromatic confocal displacement-sensor based on a spatial-bandpass-filter and an X-shaped fiber-coupler[J]. Optics Express, 2019, 27(8): 10961-10973.
- [5] Zhang Z L, Lu R S. Initial structure of dispersion objective for chromatic confocal sensor based on doublet lens[J]. Optics and Lasers in Engineering, 2021, 139: 106424.
- [6] Browne M A, Akinyemi O, Crossley F, et al. Stage-scanned chromatically aberrant confocal microscope for 3-D surface imaging[J]. Proceedings of SPIE, 1992, 1660: 532-541.
- [7] Chun B S, Kim K, Gweon D. Three-dimensional surface profile measurement using a beam scanning chromatic confocal microscope[J]. The Review of Scientific Instruments, 2009, 80(7): 073706.
- [8] Paddock S W. An introduction to confocal imaging[M]// Paddock S W. Confocal microscopy methods and protocols. Totowa: Humana Press, 1999: 1-34.
- [9] Hillenbrand M, Mitschunas B, Wenzel C, et al. Hybrid hyperchromats for chromatic confocal sensor systems[J]. Advanced Optical Technologies, 2012, 1(3): 187-194.
- [10] 杨柳青. 基于光谱共焦法的三维表面轮廓测量系统研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2018: 19.
Yang L Q. Research on three-dimensional profile measurements based on confocal chromatic sensor[D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2018: 19.
- [11] Ito S, Poik M, Csencsics E, et al. High-speed scanning chromatic confocal sensor for 3-D imaging with modeling-free learning control[J]. Applied Optics, 2020, 59(29): 9234-9242.
- [12] 刘海霞. 基于色散共焦法的精密元件三维检测方法研究[D]. 天津: 天津工业大学, 2017: 29-31.
Liu H X. Research on three-dimensional inspection method of precision components based on dispersion confocal method[D]. Tianjin: Tianjin Polytechnic University, 2017: 29-31.
- [13] Sheppard C J R, Mao X Q. Confocal microscopes with slit apertures[J]. Journal of Modern Optics, 1988, 35(7): 1169-1185.
- [14] Lin P C, Sun P C, Zhu L, et al. Single-shot depth-section imaging through chromatic slit-scan confocal microscopy[J]. Applied Optics, 1998, 37(28): 6764-6770.
- [15] Korner K, Ruprecht A K, Wiesendanger T F. New approaches in depth-scanning optical metrology[J]. Proceedings of SPIE, 2004, 5457: 320-333.
- [16] Ruprecht A K, Koerner K, Wiesendanger T F, et al. Chromatic confocal detection for high-speed microtopography measurements[J]. Proceedings of SPIE, 2004, 5302: 53-60.

- [17] Chanbai S, Wiora G, Weber M, et al. A novel confocal line scanning sensor[J]. Proceedings of SPIE, 2009, 7378: 737822.
- [18] Chen L C, Lin T Y, Chang Y W, et al. Chromatic confocal surface profilometry employing signal recovering methodology for simultaneously resolving lateral and axial cross talk problems[J]. Proceedings of SPIE, 2013, 8759: 87594I.
- [19] Hillenbrand M, Grewe A, Bichra M, et al. Parallelized chromatic confocal sensor systems[J]. Proceedings of SPIE, 2013, 8788: 87880V.
- [20] Hu H, Mei S, Fan L M, et al. A line-scanning chromatic confocal sensor for three-dimensional profile measurement on highly reflective materials[J]. The Review of Scientific Instruments, 2021, 92(5): 053707.
- [21] Huang T T, Yang J, Ma T. Design of a line-scanning dispersive objective lens for chromatic confocal displacement sensor[J]. Proceedings of SPIE, 2021, 12071: 120710S.
- [22] 鞠明岐. 白光共焦线扫描测距仪优化设计与数据处理方法研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2021: 19-20.
- Ju M Q. Optimal design and data processing method of chromatic confocal line-scan measuring instrument[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2021: 19-20.
- [23] Taphanel M, Beyerer J. Fast 3D in-line sensor for specular and diffuse surfaces combining the chromatic confocal and triangulation principle[C]//2012 IEEE International Instrumentation and Measurement Technology Conference Proceedings, May 13-16, 2012, Graz, Austria. New York: IEEE Press, 2012: 1072-1077.
- [24] Taphanel M, Zink R, Längle T, et al. Multiplex acquisition approach for high speed 3D measurements with a chromatic confocal microscope[J]. Proceedings of SPIE, 2015, 9525: 95250Y.
- [25] Seppä J, Niemelä K, Lassila A. Metrological characterization methods for confocal chromatic line sensors and optical topography sensors[J]. Measurement Science and Technology, 2018, 29(5): 054008.
- [26] Niemelä K. Chromatic line confocal technology in high-speed 3D surface-imaging applications[J]. Proceedings of SPIE, 2019, 10925: 109250O.
- [27] Kulkarni N, Masciola A, Nishant A, et al. Low-cost, chromatic confocal endomicroscope for cellular imaging *in vivo*[J]. Biomedical Optics Express, 2021, 12(9): 5629-5643.
- [28] Ramamurthy R, Caza G. Performance evaluation of line confocal imaging for surface roughness measurement application[J]. Proceedings of SPIE, 2021, 11732: 1173209.
- [29] 刘万. 基于线扫描光谱共焦测量系统的算法研究与校准研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2021: 27.
- Liu W. Research on data processing and calibration algorithm based on line scanning chromatic confocal measurement system[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2021: 27.
- [30] Wang T D, Mandella M J, Contag C H, et al. Dual-axis confocal microscope for high-resolution *in vivo* imaging [J]. Optics Letters, 2003, 28(6): 414-416.
- [31] Tiziani H J, Achi R, Krämer R N. Chromatic confocal microscopy with microlenses[J]. Journal of Modern Optics, 1996, 43(1): 155-163.
- [32] Zint M, Stock K, Claus D, et al. Development and verification of a snapshot dental intraoral three-dimensional scanner based on chromatic confocal imaging[J]. Journal of Medical Imaging, 2019, 6(3): 033502.
- [33] Chen L C, Chang Y W, Li H W. Full-field chromatic confocal surface profilometry employing digital micromirror device correspondence for minimizing lateral cross talks[J]. Optical Engineering, 2012, 51(8): 081507.
- [34] Hillenbrand M, Weiss R, Endrödy C, et al. Chromatic confocal matrix sensor with actuated pinhole arrays[J]. Applied Optics, 2015, 54(15): 4927-4936.
- [35] Cui Q, Liang R G. Chromatic confocal microscopy using liquid crystal display panels[J]. Applied Optics, 2019, 58(8): 2085-2090.
- [36] Li S B, Liang R G. DMD-based three-dimensional chromatic confocal microscopy[J]. Applied Optics, 2020, 59(14): 4349-4356.
- [37] Li S B, Song B F, Peterson T, et al. MicroLED chromatic confocal microscope[J]. Optics Letters, 2021, 46(11): 2722-2725.
- [38] Huang Y G, Tan G J, Gou F W, et al. Prospects and challenges of mini-LED and micro-LED displays[J]. Journal of the Society for Information Display, 2019, 27(7): 387-401.
- [39] Lin J Y, Jiang H X. Development of microLED[J]. Applied Physics Letters, 2020, 116(10): 100502.
- [40] Bai J, Li X H, Wang X H, et al. Chromatic confocal displacement sensor with optimized dispersion probe and modified centroid peak extraction algorithm[J]. Sensors, 2019, 19(16): 3592.
- [41] Chen C, Yang W J, Wang J, et al. Accurate and efficient height extraction in chromatic confocal microscopy using corrected fitting of the differential signal[J]. Precision Engineering, 2019, 56: 447-454.
- [42] 朱鸿. 光谱共焦位移传感器信号处理与校准研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2019.
- Zhu H. Research on signal processing and calibration of spectral confocal displacement sensor[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2019.
- [43] Li Y L, Ma Q Z, Nan G, et al. Research of chromatic spectral peak location on confocal point sensors[J]. Journal of Physics: Conference Series, 2020, 1678(1): 012092.
- [44] Bai J, Li X H, Wang X H, et al. Self-reference dispersion correction for chromatic confocal displacement measurement[J]. Optics and Lasers in Engineering, 2021, 140: 106540.
- [45] 王佳怡, 刘涛, 唐晓锋, 等. 光纤式色散共焦三维测量系统及算法比较研究[J]. 光子学报, 2021, 50(11): 1112001.
- Wang J Y, Liu T, Tang X F, et al. Fiber-coupled chromatic confocal 3D measurement system and comparative study of spectral data processing algorithms

- [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2021, 50(11): 1112001.
- [46] 宁书铭, 赵雨露. 光谱共焦位移测量系统与信号处理技术研究[J]. *仪表技术*, 2022(1): 36-39, 52.
Ning S M, Zhao Y L. Research on chromatic confocal measurement system and signal processing technology[J]. *Instrumentation Technology*, 2022(1): 36-39, 52.
- [47] Kim T, Kim S H, Do D, et al. Chromatic confocal microscopy with a novel wavelength detection method using transmittance[J]. *Optics Express*, 2013, 21(5): 6286-6294.
- [48] Minoni U, Manili G, Bettoni S, et al. Chromatic confocal setup for displacement measurement using a supercontinuum light source[J]. *Optics & Laser Technology*, 2013, 49: 91-94.
- [49] 朱万彬, 钟俊, 莫仁芸, 等. 光谱共焦位移传感器物镜设计[J]. *光电工程*, 2010, 37(8): 62-66.
Zhu W B, Zhong J, Mo R Y, et al. Design of spectral confocal chromatic displacement sensor objective[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2010, 37(8): 62-66.
- [50] 刘乾, 杨维川, 袁道成, 等. 光谱共焦位移传感器的色散物镜设计[J]. *光电工程*, 2011, 38(7): 131-135.
Liu Q, Yang W C, Yuan D C, et al. Design of dispersive objective for chromatic confocal displacement sensor[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2011, 38(7): 131-135.
- [51] 金博石, 邓文怡, 牛春晖, 等. 光谱共焦测量系统中的色散透镜组设计[J]. *光学技术*, 2012, 38(6): 660-664.
Jin B S, Deng W Y, Niu C H, et al. Design of dispersive lens group for chromatic confocal measuring system[J]. *Optical Technique*, 2012, 38(6): 660-664.
- [52] 刘乾, 杨维川, 袁道成, 等. 光谱共焦显微镜中色散物镜材料的优化选择[J]. *光电工程*, 2012, 39(8): 111-117.
Liu Q, Yang W C, Yuan D C, et al. Optimization and selection of materials for dispersive objective of chromatic confocal microscope[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2012, 39(8): 111-117.
- [53] 刘乾, 杨维川, 袁道成, 等. 光谱共焦显微镜的线性色散物镜设计[J]. *光学精密工程*, 2013, 21(10): 2473-2479.
Liu Q, Yang W C, Yuan D C, et al. Design of linear dispersive objective for chromatic confocal microscope[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2013, 21(10): 2473-2479.
- [54] 牛春晖, 李晓英, 郎晓萍. 光谱共焦透镜组设计及性能优化[J]. *北京信息科技大学学报(自然科学版)*, 2013, 28(2): 42-45.
Niu C H, Li X Y, Lang X P. Design and performance optimization of chromatic confocal lens[J]. *Journal of Beijing Information Science & Technology University*, 2013, 28(2): 42-45.
- [55] 王津楠, 陈凤东, 刘炳国, 等. 基于白光 LED 的光谱共焦位移传感器[J]. *中国测试*, 2017, 43(1): 69-73.
Wang J N, Chen F D, Liu B G, et al. White LED-based spectrum confocal displacement sensor[J]. *China Measurement & Test*, 2017, 43(1): 69-73.
- [56] Qian K, Zuo C, Yu Y, et al. Design research of chromatic lens in chromatic confocal point sensors[J]. *Proceedings of SPIE*, 2018, 10827: 108270D.
- [57] 杨锐, 云宇, 解滨, 等. 光谱共焦三维形貌仪用超大色散线性物镜组设计[J]. *强激光与粒子束*, 2018, 30(5): 15-19.
Yang R, Yun Y, Xie B, et al. Design of dispersive objective lens of large linear chromatic confocal 3D surface profiler[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2018, 30(5): 15-19.
- [58] 蒲涛. 基于色差共焦技术的测量系统研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2019: 29-30.
Pu T. Research on measurement system based on chromatic aberration confocal technology[D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2019: 29-30.
- [59] Rayer M, Mansfield D. Chromatic confocal microscopy using staircase diffractive surface[J]. *Applied Optics*, 2014, 53(23): 5123-5130.
- [60] Dobson S L, Sun P C, Fainman Y. Diffractive lenses for chromatic confocal imaging[J]. *Applied Optics*, 1997, 36(20): 4744-4748.
- [61] Liu T, Wang J Y, Liu Q, et al. Chromatic confocal measurement method using a phase Fresnel zone plate[J]. *Optics Express*, 2022, 30(2): 2390-2401.
- [62] Park H M, Kwon U, Joo K N. Vision chromatic confocal sensor based on a geometrical phase lens[J]. *Applied Optics*, 2021, 60(10): 2898-2901.
- [63] Novak J, Miks A. Hyperchromats with linear dependence of longitudinal chromatic aberration on wavelength[J]. *Optik*, 2005, 116(4): 165-168.
- [64] 武芑樾, 袁道成. 光谱共焦位移传感器镜头设计研究[J]. *工具技术*, 2012, 46(2): 81-83.
Wu P Y, Yuan D C. Research of design of lenses used for chromatic confocal displacement sensor[J]. *Tool Engineering*, 2012, 46(2): 81-83.
- [65] 刘乾, 王洋, 杨维川, 等. 线性色散设计的光谱共焦测量技术[J]. *强激光与粒子束*, 2014, 26(5): 58-63.
Liu Q, Wang Y, Yang W C, et al. Chromatic confocal microscope with linear dispersive objective[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2014, 26(5): 58-63.
- [66] 梁青, 薛丹, 伍星昱. 光谱共焦位移传感器镜头设计[J]. *光学技术*, 2019, 45(6): 653-659.
Liang Q, Xue D, Wu X Y. Lens design for chromatic confocal displacement sensor[J]. *Optical Technique*, 2019, 45(6): 653-659.
- [67] 马敬, 齐月静, 卢增雄, 等. 光谱共焦位移传感器线性色散物镜设计[J]. *中国激光*, 2019, 46(7): 0704009.
Ma J, Qi Y J, Lu Z X, et al. Design of linear dispersive objective for chromatic confocal displacement sensor[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2019, 46(7): 0704009.
- [68] Jiang W Q, Zeng A J, Huang H J. Design of linear hyperchromatic lens in chromatic focal displacement sensor[J]. *Proceedings of SPIE*, 2020, 11568: 1156803.
- [69] 崔长彩, 李煌, 余卿, 等. 彩色共焦系统可调制色散物镜设计[J]. *光学精密工程*, 2017, 25(4): 343-351.
Cui C C, Li H, Yu Q, et al. Design of adjustable dispersive objective lens for chromatic confocal system[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2017, 25(4): 343-351.

- [70] Yang J, Ma T, Huang T T. Design of chromatic confocal quantitative inverse dispersive objective lens[J]. Proceedings of SPIE, 2021, 11763: 117638T.
- [71] 武芃樾. 光谱共焦位移传感器设计技术研究[D]. 绵阳: 中国工程物理研究院, 2012.
Wu P Y. Research on design technology of spectral confocal displacement sensor[D]. Mianyang: China Academy of Engineering Physics, 2012.
- [72] Hillenbrand M, Mitschunas B, Brill F, et al. Spectral characteristics of chromatic confocal imaging systems[J]. Applied Optics, 2014, 53(32): 7634-7642.
- [73] Sheppard C J R, Gu M. Imaging performance of confocal fluorescence microscopes with finite-sized source[J]. Journal of Modern Optics, 1994, 41(8): 1521-1530.
- [74] Claus D, Pedrini G, Boettcher T, et al. Development of a realistic wave propagation-based chromatic confocal microscopy model[J]. Proceedings of SPIE, 2018, 10677: 106770X.
- [75] Chen C, Leach R, Wang J, et al. Two-dimensional spectral signal model for chromatic confocal microscopy [J]. Optics Express, 2021, 29(5): 7179-7196.
- [76] Nizami M R, Claus D. A wave-optical model for chromatic confocal sensing using multimode fibre incoherent illumination[J]. Journal of Optics, 2021, 23(11): 115608.
- [77] 王津楠. 光谱共焦位移传感器研究与设计[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2016: 8-9.
Wang J N. Research and design of chromatic confocal displacement sensor[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2016: 8-9.
- [78] 柳晓飞, 邓文怡, 牛春晖, 等. 一种新型光谱共焦位移测量系统研究[J]. 传感器与微系统, 2013, 32(4): 34-36, 40.
Liu X F, Deng W Y, Niu C H, et al. Research on a novel displacement measurement system of spectrum confocal[J]. Transducer and Microsystem Technologies, 2013, 32(4): 34-36, 40.
- [79] 王文娟. 基于光谱共焦原理的表面粗糙度测量方法研究[D]. 西安: 西安理工大学, 2021.
Wang W J. Research on surface roughness measurement method based on the principle of spectral confocal[D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2021.
- [80] Sánchez-Ortiga E, Sheppard C J R, Saavedra G, et al. Subtractive imaging in confocal scanning microscopy using a CCD camera as a detector[J]. Optics Letters, 2012, 37(7): 1280-1282.
- [81] 张志强. 光谱共焦线扫描测量方法研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2021: 17-9.
Zhang Z Q. Research on the measurement method of line-scan chromatic confocal microscopy[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2021: 17-9.
- [82] Wilson T, Carlini A R. Size of the detector in confocal imaging systems[J]. Optics Letters, 1987, 12(4): 227-229.
- [83] Wilson T, Hewlett S J, Sheppard C J. Use of objective lenses with slit pupil functions in the imaging of line structures[J]. Applied Optics, 1990, 29(31): 4705-4714.
- [84] Chen L C. Confocal Microscopy for Surface Profilometry [M]//Gao W. Metrology. Singapore: Springer, 2019: 59-92.
- [85] Peterson G, Zanoni D K, Ardigo M, et al. Feasibility of a video-mosaicking approach to extend the field-of-view for reflectance confocal microscopy in the oral cavity *in vivo*[J]. Lasers in Surgery and Medicine, 2019, 51(5): 439-451.
- [86] Maitland K C. Handheld reflectance confocal endomicroscope for imaging of the oral cavity (Conference Presentation) [J]. Proceedings of SPIE, 2016, 9700: 97000V.
- [87] Maitland K C, Gillenwater A M, Williams M D, et al. *In vivo* imaging of oral neoplasia using a miniaturized fiber optic confocal reflectance microscope[J]. Oral Oncology, 2008, 44(11): 1059-1066.
- [88] Risi M D, Rouse A R, Chambers S K, et al. Pilot clinical evaluation of a confocal microlaparoscope for ovarian cancer detection[J]. International Journal of Gynecological Cancer, 2016, 26(2): 248-254.
- [89] Piyawattanametha W, Ra H, Loewke K E, et al. *In vivo* near-infrared dual-axis confocal microendoscopy in the human lower gastrointestinal tract[J]. Journal of Biomedical Optics, 2012, 17(2): 021102.
- [90] Tabatabaei N, Kang D, Kim M, et al. Clinical translation of tethered confocal microscopy capsule for unsedated diagnosis of eosinophilic esophagitis[J]. Scientific Reports, 2018, 8: 2631.
- [91] Fujita Y, Wei L, Cimino P J, et al. Video-mosaicked handheld dual-axis confocal microscopy of gliomas: an *ex vivo* feasibility study in humans [EB/OL]. [2022-10-06]. <https://europepmc.org/articles/PMC7482651>
- [92] Olsovsky C, Shelton R, Carrasco-Zevallos O, et al. Chromatic confocal microscopy for multi-depth imaging of epithelial tissue[J]. Biomedical Optics Express, 2013, 4(5): 732-740.
- [93] Li J F, Zhu X P, Du H, et al. Thickness measurement method for self-supporting film with double chromatic confocal probes[J]. Applied Optics, 2021, 60(30): 9447-9452.
- [94] Bai J, Li J W, Wang X H, et al. A new method to measure spectral reflectance and film thickness using a modified chromatic confocal sensor[J]. Optics and Lasers in Engineering, 2022, 154: 107019.
- [95] Yu Q, Zhang Y L, Shang W J, et al. Thickness measurement for glass slides based on chromatic confocal microscopy with inclined illumination[J]. Photonics, 2021, 8(5): 170.
- [96] Bai J, Wang Y Z, Wang X H, et al. Three-probe error separation with chromatic confocal sensors for roundness measurement[J]. Nanomanufacturing and Metrology, 2021, 4(4): 247-255.
- [97] Wang Y Z, Bai J, Huang G Y, et al. High precision roundness measurement with two chromatic confocal sensors[J]. Proceedings of SPIE, 2021, 11899: 1189915.
- [98] Fu S W, Kor W S, Cheng F, et al. *In-situ* measurement of surface roughness using chromatic confocal sensor[J]. Procedia CIRP, 2020, 94: 780-784.

- [99] Lane P M, Elliott R P, MacAulay C E. Confocal microendoscopy with chromatic sectioning[J]. Proceedings of SPIE, 2003, 4959: 23-26.
- [100] Sheppard C J R, Cogswell C J. Confocal microscopy with detector arrays[J]. Journal of Modern Optics, 1990, 37(2): 267-279.
- [101] Chen Z Z, Wang Z D, Ren M J, et al. Development of an on-machine measurement system for ultra-precision machine tools using a chromatic confocal sensor[J]. Precision Engineering, 2022, 74: 232-241.
- [102] Ye L, Qian J, Haitjema H, et al. On-machine chromatic confocal measurement for micro-EDM drilling and milling [J]. Precision Engineering, 2022, 76: 110-123.
- [103] Wang Y Q, Xi M M, Liu H B, et al. On-machine noncontact scanning of high-gradient freeform surface using chromatic confocal probe on diamond turning machine[J]. Optics & Laser Technology, 2021, 134: 106569.
- [104] Zakrzewski A, Koruba P, Ćwikła M, et al. The determination of the measurement beam source in a chromatic confocal displacement sensor integrated with an optical laser head[J]. Optics & Laser Technology, 2022, 153: 108268.
- [105] Csőke L T, Kautny S, Domján L, et al. Development and validation of a surface profiling system for end of line monitoring of microstructured elastomer seals based on chromatic confocal microscopy[J]. Precision Engineering, 2022, 77: 365-374.
- [106] Zakrzewski A, Ćwikła M, Koruba P, et al. Design of a chromatic confocal displacement sensor integrated with an optical laser head[J]. Applied Optics, 2020, 59(29): 9108-9117.