

用于生物医疗信息采集的多光谱均匀光源系统

刘懿黛 宋家勇 王阳 丁召 杨晨

Multispectral uniform light source system for acquisition of biomedical information

LIU Yidai, SONG Jiayong, WANG Yang, DING Zhao, YANG Chen

引用本文:

刘懿黛, 宋家勇, 王阳, 等. 用于生物医疗信息采集的多光谱均匀光源系统[J]. 应用光学, 2022, 43(1): 144–151. DOI: 10.5768/JAO202243.0105004

LIU Yidai, SONG Jiayong, WANG Yang, et al. Multispectral uniform light source system for acquisition of biomedical information[J]. Journal of Applied Optics, 2022, 43(1): 144–151. DOI: 10.5768/JAO202243.0105004

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.5768/JAO202243.0105004>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

一种环形屏积分球光源的辐照均匀度研究

Research on radiation uniformity of annular baffle integrating sphere light source

应用光学. 2019, 40(4): 632–637 <https://doi.org/10.5768/JAO201940.040300>

一种环形屏积分球光源的辐照均匀度研究

Research on radiation uniformity of annular baffle integrating sphere light source

应用光学. 2019, 40(4): 632–637 <https://doi.org/10.5768/JAO201940.0403001>

星载微光传感器外场辐射定标光源的研制和检测

Design and test of in-site radiometric calibration reference light source for spaceborne low light level remote sensors

应用光学. 2020, 41(1): 140–144 <https://doi.org/10.5768/JAO202041.0103002>

两种玻璃微通道阵列的制作技术及比较

Two kinds of making technologies of glass micro-channel arrays and their comparison

应用光学. 2021, 42(5): 796–801 <https://doi.org/10.5768/JAO202142.0501006>

大口径积分球光源绝对辐射定标技术研究

Absolute radiometric calibration technique of large aperture integrating sphere source

应用光学. 2020, 41(6): 1236–1240 <https://doi.org/10.5768/JAO202041.0603003>

一种胶片式的静态光学目标模拟器

Static optical target simulator using films

应用光学. 2020, 41(1): 33–36 <https://doi.org/10.5768/JAO202041.0101005>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

文章编号: 1002-2082 (2022) 01-0144-08

用于生物医疗信息采集的多光谱均匀光源系统

刘懿黛¹, 宋家勇¹, 王 阳¹, 丁 召¹, 杨 晨^{1,2}

(1. 贵州大学 大数据与信息工程学院, 半导体功率器件可靠性教育部工程研究中心, 贵州 贵阳 550025; 2. 贵阳朗玛信息技术股份有限公司 博士后流动站, 贵州 贵阳 550081)

摘 要: 多光谱成像是无创观察生物组织的有效工具, 提高光源的辐照均匀性将更有利于准确获取病理组织的多光谱数据。提出基于积分球的多光谱均匀光源系统, 为生物组织的多光谱数据采集提供均匀辐照。基于蒙特卡罗光线追迹法对积分球腔体的取位方式进行选择, 并对腔体大小、LED 布局、积分球输出槽尺寸进行了优化, 以确定结构模型的最佳参数; 根据优化参数构造了集成 11 种窄波段 LED 的实例进行了光学性能验证, 实验结果证明所有波段都能在输出槽的主要部分区域实现 2% 辐照度不均匀性分布; 研究了该系统的宽光谱兼容能力, 实验结果表明, 光谱在输出槽的最大均方根误差为 3.74%, 具有良好的宽光谱兼容能力; 最后, 基于所提出的系统进行了静脉可视化测试, 用光纤拓展了系统内窥镜的兼容性, 并以此探讨了口腔内部牙齿表面病理情况。该系统的多功能性和均匀性在生物医疗图像采集中具有潜在的应用价值。

关键词: 积分球; 静脉可视化; 多波段光源; 均匀性; 医用光源; 内窥镜检测

中图分类号: TN202; O439

文献标志码: A

DOI: [10.5768/JAO202243.0105004](https://doi.org/10.5768/JAO202243.0105004)

Multispectral uniform light source system for acquisition of biomedical information

LIU Yidai¹, SONG Jiayong¹, WANG Yang¹, DING Zhao¹, YANG Chen^{1,2}

(1. Power Semiconductor Device Reliability Engineering Center (Ministry of Education), College of Big Data and Information Engineering, Guizhou University, Guiyang 550025, China; 2. Postdoctoral Workstation in Longmaster Co., Ltd., Guiyang 550081, China)

Abstract: The multispectral imaging is an effective tool for noninvasive observation of biological tissues, and it can further accurately obtain the multispectral data of pathological tissues by improving the irradiance uniformity of the light source. Therefore, the multispectral uniform light source system based on the integrating sphere was proposed to provide uniform irradiance for multispectral data acquisition of biological tissues. First, in order to determine the optimal parameters of the structural model, the design scheme of the integrating sphere was selected based on the Monte Carlo ray tracing method (MCRT), and the cavity size, LED layout, and the output slot size of the integrating sphere were optimized. Then, an example with 11 integrated narrow-band LEDs was constructed for optical performance verification based on the optimized parameters, and the experimental results showed that all the used bands could achieve 2% irradiance nonuniformity distribution in the major part of the output slot. And the broad-spectrum compatibility of the system was studied and the experimental results showed that the maximum root-mean-square error of the spectrum in the output slot was 3.74%, which had good broad-spectrum compatibility. Finally, based on the proposed system, venous visualization tests were performed and the endoscope compatibility of the system was extended with optical fiber and used to investigate the internal dental surface pathology of the oral cavity. The multifunctionality and

收稿日期: 2021-06-28; 修回日期: 2021-09-25

基金项目: 国家自然科学基金 (62065003); 半导体功率器件可靠性教育部工程研究中心开放基金 (黔科合平台人才 20176103 号); 贵州大学人才引进项目

作者简介: 刘懿黛 (1996—), 女, 硕士研究生, 主要从事光电系统研究。E-mail: liuyidai@163.com

通信作者: 杨晨 (1982—), 男, 博士, 教授, 硕士生导师, 主要从事图像处理 and 光电系统方面的研究。E-mail: eliot.c.yang@163.com

uniformity of the system has potential applications in biomedical image acquisition.

Key words: integrating sphere; venous visualization; multi-band light source; uniformity; medical light source; endoscopic detection

引言

多光谱成像 (multispectral imaging, MSI) 技术是一种基于光谱学和成像技术的测量方法, 它能够同时获取光谱特征和空间图像信息。由于其具备快速、精确、高灵敏度、无损伤和高安全性等优点, 被广泛应用于军事^[1]、刑侦^[2]、药学^[3] 以及生物医学^[4] 等领域。

作为医疗应用中新兴的成像模式, 多光谱成像为非侵入性的疾病诊断和治疗提供了巨大的潜力, 许多学者基于此报道了大量工作。2013年 Noah Bedard 等^[5] 利用多光谱成像技术研究口腔癌病理情况检测, 提供了一种简单高效的无创诊断口腔癌思路。廖乘胜等^[6] 在 2017 年选用 462 nm、525 nm、570 nm 以及 625 nm 共 4 个波段构成的组合光源代替显微镜原有光源, 建立了一个显微多光谱成像系统, 该系统可进行福尔根染料染色剂吸光度剥离, 更突显了细胞的染色特性并合成为彩色图像。2019 年 Ahmed L. Abdel Gawad 等^[7] 尝试了在多光谱系统下对口腔内牙齿表面病理情况进行分析, 提出的光谱成像系统能够区分样本的正常部分和病变类型。2020 年王成等^[8] 采用 13 个窄带 LED 放置于铜质密闭盒中作为多光谱成像系统光源模块, 该光源组合兼具光源和分光系统功能, 整个系统可实现多光谱下生物病理分析。虽然目前围绕多光谱在医疗中的应用已经有大量报道, 但是, 仍然缺少对辐照度均匀的多功能多光谱系统的尝试。均匀的辐照能避免在多光谱数据采集过程中出现眩光、镜面反射和不必要的阴影等负面影响, 满足更多生物医学领域的应用需求^[9]。

本文基于积分球结构设计了一种低成本、多功能、辐照度均匀的多光谱系统, 该系统不仅能提供独立的辐照均匀的多波段窄光谱光源, 且兼容宽光谱输出和内窥镜应用。针对提出的系统结构, 首先, 通过蒙特卡罗光线追迹法对系统的腔体大小、光源布局、输出槽尺寸等参数进行仿真优化, 提高光源的均匀性。然后, 基于优化结果搭建了一个带有 11 个独立输出波段 LED 的实例以验证光源均匀性和宽光谱兼容能力。最后, 通过系统对静脉进行可视化测试并基于光纤拓展内窥镜应用, 探究了牙齿表面病理情况。

1 系统设计

1.1 结构描述

如图 1(a) 所示, 多光谱均匀光源系统主要由球形腔体、多 LED 灯组合的 LED 灯簇、中心挡板、出口遮挡盖和光纤束 5 个模块构成。本文所采用的相应结构参数也同样被列举于图中, LED 灯簇内置在球形腔体作为发光源, 球形腔体内壁和中心挡板用于增加 LED 光线在腔体中的反射次数, 保证输出槽的辐照均匀性。该系统提供两种光线的输出方式: 输出槽输出和光纤束输出。当需要对体表进行多光谱数据采集时, 光线直接从输出槽输出; 当需要对体内组织进行多光谱数据采集时, 将出口遮挡盖衔扣于输出槽上方, 将光线耦合进光纤束进行输出, 可供内窥镜使用。通过 Aziz ul Rehman 等人^[10] 的工作, 发现积分球能够提供均匀光照用于生物医学检测。通过前期对球形腔体的大量研究^[11], 发现积分球腔体的结构参数会进一步影响光学性能, 因此, 采用积分球结构进行多光谱系统的构建, 并优化结构参数以改善其光学性能。

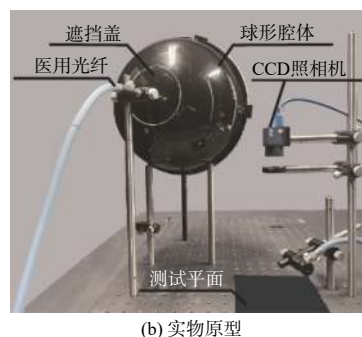
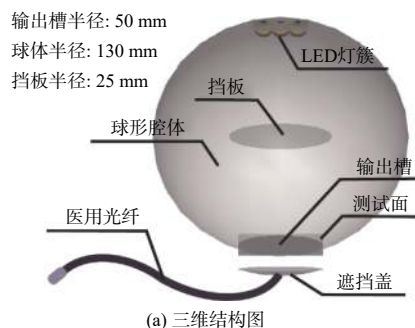


图 1 多光谱系统结构示意图

Fig. 1 Schematic diagram of multispectral system structure

图 1(b) 为光源系统的实物原型。采用一些容易在市场获得且价格经济实惠的材料进行原型构

建,腔体、挡板和出口遮挡盖由亚克力材料制成,并在其内部均匀喷涂硫酸钡。在球腔内部共集成 350 nm~800 nm 范围内 11 种不同波段的 1 W 标称大功率 LED 灯,用于提供多光谱数据的采集,在标准电压下通过 Ocean Optics USB 2000+光谱仪测量所有 LED 波长,其性能如表 1 所示。该波段范围是基于生物医疗方面光谱测试的常用波段范围,比如乳腺癌的检测、静脉可视化以及牙齿表面病理诊断等^[7, 12-13]。此外,多光谱成像系统中的带宽一般为 20 nm~50 nm,但在组织光学理论中分辨率较高的情况下相邻波段的光谱数据差别较小^[8],并且光谱分辨率越高数据处理难度也越大,因此本文在此波段范围采用中心波长间隔大约为 50 nm 进行 LED 波段选择。为了兼容内窥镜应用,将一根通光直径为 4 mm 光纤用于积分球光源,导入人体内部进行各种病理观察。为保持腔体的完整性,通过外接电路进行 LED 控制。

表 1 LED 的光、电性质
Table 1 Optical and electrical properties of LEDs

波峰/nm	半波宽/nm	标称功率/W	标准电压/V	单价/元
368	10	1	3.4	20
395	13	1	3.4	20
463	19	1	3.2	20
508	22	1	3.2	20
560	35	1	3.0	20
607	15	1	2.0	20
628	19	1	2.0	20
681	17	1	2.0	25
695	19	1	2.0	25
738	20	1	2.0	20
797	33	1	1.8	20

目前,在医疗图像获取的相关照明领域,并未对光源系统的设计参数进行要求。然而,通过总结大量的文献^[9, 14-15],发现光照系统的辐照均匀性可减少多光谱数据采集过程中出现的眩光、镜面反射和不必要的阴影等负面影响。本文采用了积分球进行设计,实现系统辐照均匀性,并基于蒙特卡罗光线追迹法对腔体光源取位结构进行选择,对 LED 布局、输出槽尺寸等结构参数进行优化。蒙特卡罗光线追迹法是一种光学领域常用的光学性能分析手段,可以对系统的辐照分布^[16]、光学效率^[17]和热流分布^[18]等光学性能进行分析。对于系统均匀性评估,多光谱光源领域缺乏相关判定标准,本文借鉴半导体光伏器件测试的均匀性标准(IEC60904-9 标准)^[19]进行评估,并依据该标准对系统设计中的光源辐照均匀性做了进一步的约束,

设计出不均匀度达到该标准 A 级的光源系统,即可实现不均匀度小于 2% 辐照度输出。在 IEC60904-9 标准下,光源系统辐照度不均匀性可以由下式进行评估:

$$B_{ias} = \pm \frac{E_{max} - E_{min}}{E_{max} + E_{min}}$$

式中: E_{max} 为整个测试平面中的辐照度最大值; E_{min} 为辐照度最小值。

1.2 腔体取位选择

积分球作为常用的光学积分器,光源与出口设置方式主要有垂直取位方式和直线取位加挡板方式,本文对比了这两种取位方式的光学性能以进行结构取舍,其光学性能对比结果如图 2 所示。从图 2(a)可看出,对于辐照度不均匀性来说,当输出槽较小时,两种腔体取位的辐照度均匀性相差较小;当输出槽较大时,垂直取位方式所产生的辐照度均匀性明显次于直线取位方式。这是由于在垂直取位方式时,受到光源发光图案限制(即光源向各个方向发射的光线数量不同)和更多的光线直接从输出槽射出腔体,导致探测平面辐照度分布不对称^[20]。

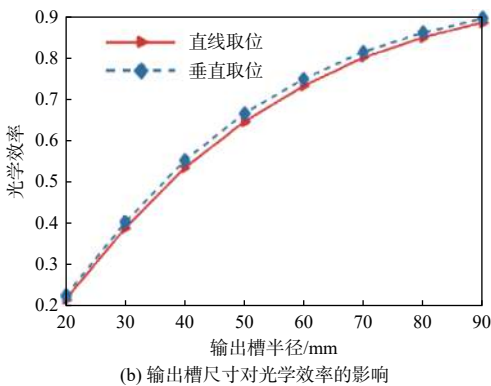
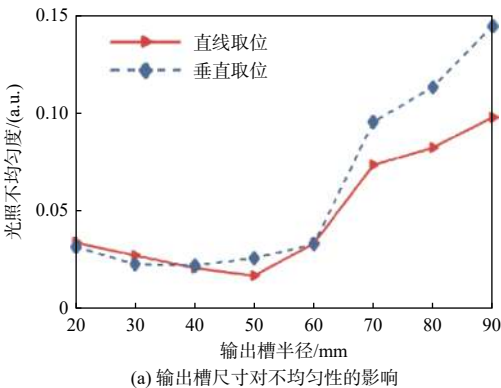


图 2 光学性能仿真结果图

Fig. 2 Curves of optical performance simulation results

对于光学效率,定义为测试平面接收到的光能量与光源输出光能量的比值^[14]。其具体计算公式

如下:

$$\eta = \frac{E_{\text{test}}}{E_{\text{source}}}$$

式中: E_{test} 测试平面为接收到的光的能量; E_{source} 为光源的输出能量。

从图 2(b)可以看出,腔体取位的不同也会导致其光学效率存在差异。垂直取位方式的光学效率优于直线取位方式,这是由于挡板可使更多的光线被积分球腔体吸收。然而,两者之间的差值较小,因此,在光学效率要求较低的使用环境中,光学效率带来的影响可以忽略。

综上所述,为实现系统的高辐照度均匀性目的,本系统采用直线取位加挡板的结构形式进行系统设计。此外,对腔体半径和 LED 布局等结构参数也进行了优化。

1.3 结构参数优化

1.3.1 腔体半径

为了研究腔体半径尺寸对腔体光学性能的影响,在保证输出槽大小一定的情况下,逐步改变半径尺寸进行蒙特卡罗光线追迹法仿真,得到了如图 3 所示的结果。从图 3 可知,随着积分球腔体半径的逐步增大,光学效率也呈现出明显的下降趋势,这是由于更大的腔体会导致更多的光线在射出输出槽前被腔体进行多次反射,使更多的光线被腔体吸收。对于辐照不均匀度而言,由于积分球的输出槽辐照度均匀性与光源光线在腔体内部是否充分反射相关^[21],因此随着腔体增大,导致多次反射的光线也会随着积分球腔体半径的增大,呈现出先下降,之后稳定在一个相对均匀的数值范围内的现象。所以,对于腔体半径的选择,应该考虑辐照度均匀性和光学效率两大因素。

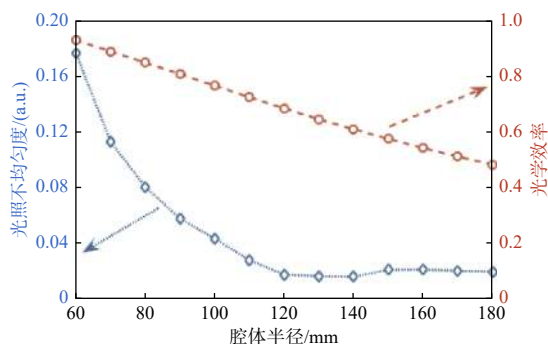


图 3 腔体半径对不均匀性和光学效率的影响

Fig. 3 Effect of cavity radius on nonuniformity and optical efficiency

1.3.2 LED 布局

为了研究 LED 位置对均匀性的影响,参照图 1

所示结构数据,围绕着积分球内表面布置了 5 个不同的 LED 位置,如图 4 所示。图 4 中给出了不同 LED 位置的辐照均匀性等高线分布情况,可看出随着 LED 逐渐靠近输出槽,其辐照均匀度逐渐下降,这可以通过光线未经充分反射而逸出腔体来解释。袁银麟等人^[21]的研究表明,光线的一次出射情况会影响输出槽的辐照均匀度。当 LED 正对输出槽布置时,由于挡板的散射作用,一次出射的光线数量最少,使得此时的辐照度均匀性最佳。当 LED 逐步靠近输出槽时,更多的光线直接射出输出槽而不是在腔体内部进行多次反射,这就导致了辐照度均匀性下降。因此,对于 LED 的布局,应尽量正对输出槽布置。

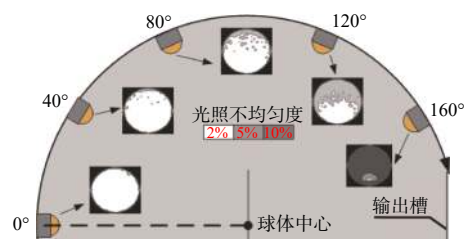


图 4 LED 布局示意图

Fig. 4 Schematic diagram of LED layout

1.3.3 输出槽尺寸

输出槽尺寸是影响辐照均匀性的主要因素之一,可通过蒙特卡罗光线追迹法仿真研究输出槽尺寸对积分球辐照均匀性和光学效率的影响。图 5 给出了输出槽 80% 半径区域中均匀性和光学效率随输出槽尺寸的变化。从图 5 可以看出,当输出槽过大或者过小时,都会对积分球的均匀性和光学效率产生较大的影响。当输出槽较大时,部分光线从积分球内部一次出射,减少了积分球对光线的吸收,虽然得到了较高的光学效率,但也导致了

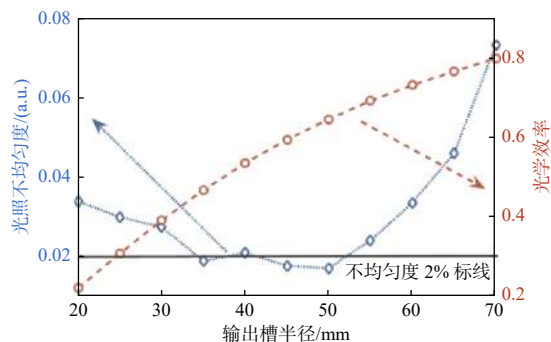


图 5 输出槽尺寸对不均匀性和光学效率的影响

Fig. 5 Effect of output slot size on nonuniformity and optical efficiency

均匀性降低。当输出槽较小时,由于光线在积分球内部反射次数增加,导致了其光学效率下降。同时,较小的辐照面积也会受到更多的槽边缘的干扰,使辐照均匀性也逐步降低。此外,输出槽的尺寸还关系到光源的有效输出面积,因此在多光谱系统的设计中,应综合考量系统的辐照度均匀性、光学效率和有效输出面积,最后确定输出槽半径为 50 mm 进行实际设计。

2 实验与分析

2.1 辐照均匀性

在实际工作中测量系统的辐照度不均匀性分布如图 6 所示。参考 IEC60904-9 标准^[19],将输出槽的辐照度不均匀性分布划分为 2%(A 级)、5%(B 级)和 10%(C 级)3 个区域。从图 6 中可以看出,在主要的输出平面区域内,所有独立波段都实现了最高级的辐照均匀性分布。

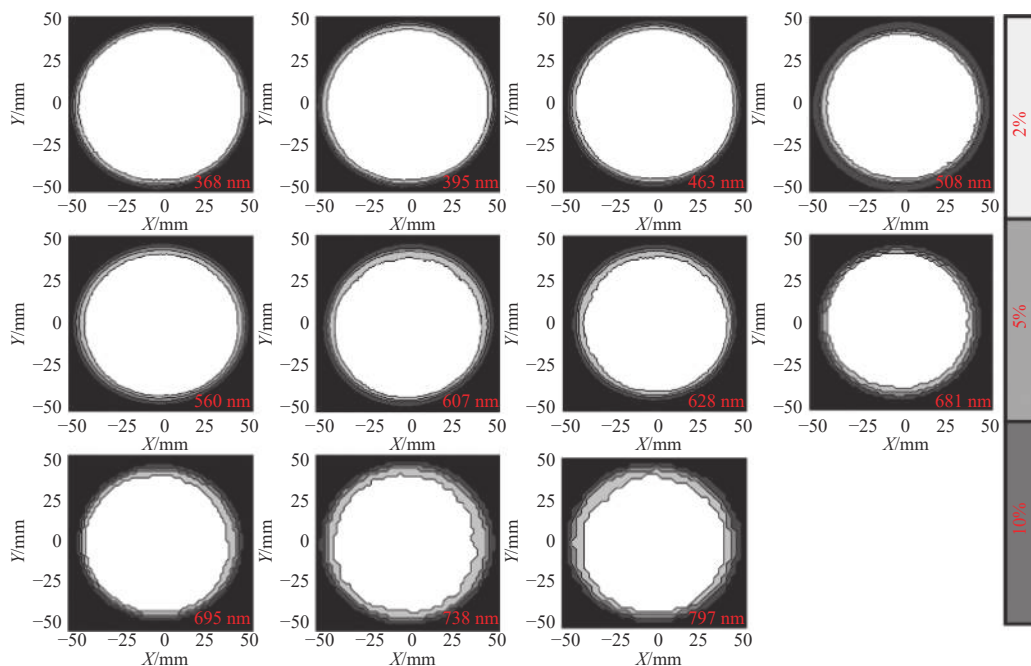


图 6 不同波段下实测的辐照均匀性等高线分布图

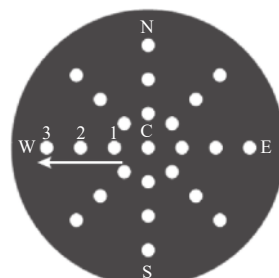
Fig. 6 Measured contour distribution of irradiance uniformity under different wavebands

在输出槽的边缘,由于每个 LED 布局位置的差异性和一些系统结构制作过程中产生的非理想因素,导致个别波段边缘不均匀性增加。因此,在实际的多光谱数据采集过程中,应将样品尽量布置于输出槽中心位置。

2.2 宽光谱兼容性

宽光谱光源输出也是多光源光学设计中考虑的问题之一,使用多个窄波段光源混合可匹配出所需的宽光谱光源,如太阳光光谱、各种色温的白光等^[22-23]。由于系统输出槽每个窄波段辐照均匀性以及 LED 光强的易调节性,能在整个输出槽平面获得一致的可调节频谱分布,所以本文提出的系统能适用于宽光谱照明技术。为验证实物系统的宽光谱兼容能力,在输出槽布置了如图 7(a)所示的 25 个样本位置,并从中

随机抽取 5 个位置进行频谱分布采集,结果如图 7(b)所示。均方根误差是衡量数据偏差的常用物理量,本文采用其评估输出槽平面频谱分布一致性,得到如图 7(c)所示的结果。从图 7(c)可以看出,在系统输出槽上整个光谱的最大均方根误差 (RMSE) 为 3.74%,具有良好的宽光谱兼容能力。



(a) 采样位置分布

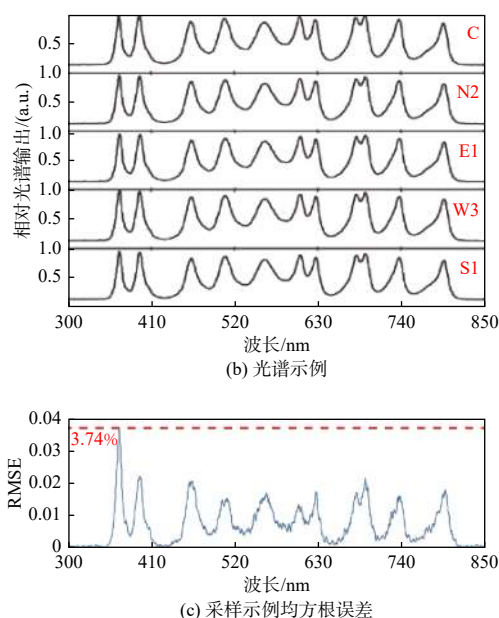


图7 宽光谱测试图

Fig. 7 Diagram of wide spectrum test

2.3 静脉可视化

针对体外应用,利用该系统进行了人体静脉可视化测试。由于红光以及近红外光穿透皮肤能力强,可到达深层皮肤组织,并且组成静脉的主要成分——血红蛋白对红光以及近红外光的吸收较强,因此,可利用红光或近红外光进行人体静脉可视化研究。图8给出了3个手背静脉样本图像。其获取过程可以分为2个步骤:一是在不同波段光源照射下利用CCD相机拍摄获得其初始灰度图像;二是为限制均匀灰度区域的对比度,抑制噪声并增强图像,采用自适应直方图均衡图像增强算法对初始灰度图像进行归一化增强处理,从而得到样本图像。从图8可以看出,随着波段逐步从463 nm增高至797 nm时(即光源逐步从蓝光移动到近红外光),静脉的轮廓逐渐清晰;在463 nm时,几乎无法识别静脉,便于采集样本轮廓;在607 nm和681 nm时,静脉轮廓模糊;在797 nm时,采集到

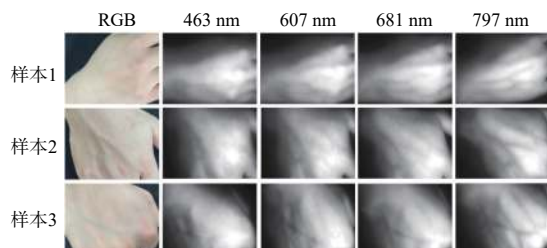


图8 不同波段下3个样本的静脉灰度图

Fig. 8 Venous gray scale images of three samples under different wavebands

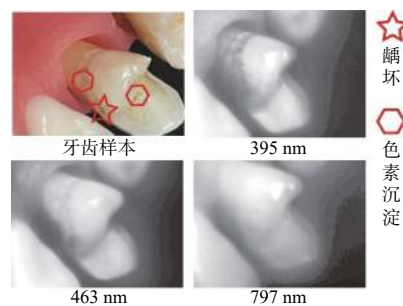
的样本静脉清晰可见,利于静脉图像的精准采集。

2.4 内窥镜兼容性

内窥镜是一种用于人体内部病理检查的重要设备^[24-25]。本文采用了如图9(a)所示医用光纤(通光直径4 mm)和输出槽遮挡盖扩展了系统在内窥镜上的兼容性。当需要使用内窥镜时,可将遮挡盖衔扣在输出槽,并把光纤端面嵌入到遮挡盖预留的小孔中,通过直接耦合的方式使光源耦合进光纤。马丽文等人的研究^[26]表明,光源发光面积与光纤横截面积基本一致,可有效减少耦合损耗,故在实例设置中,遮挡盖预留的小孔和光纤端面尺寸基本一致,迫使积分球输出口的发光面积与光纤横截面积保持一致,以减少耦合损耗。此外,遮挡盖的设置能使更多原本从积分球输出口直接射出的光线经过遮挡盖再次反射后回到腔体,在腔体多次反射后到达小孔,从而进一步增加小孔的光线密度,提高光纤的辐照度。



(a) 光源使用示意图



(b) 牙齿样本采集图像

图9 内窥镜兼容性测试图

Fig. 9 Diagram of endoscope compatibility test

基于光纤内窥镜对牙齿表面病理进行多光谱数据采集,如图9(b)所示。为模拟真实的口腔内部环境,采用3D打印技术构建了一个口腔模型,并在其上面布置带有龋坏及色素沉淀等病理情况的真实牙齿样本。由于存在天然内源荧光分子及外源荧光分子,因此牙齿样本中不同患病部位显示的荧光强度会有所不同。从图9(b)可以看出,395 nm波段光照时,图像中存在病症的区域荧

光效果很差,呈现较强的暗黑感,可用于初期粗略诊断是否存在病情;在 463 nm 光照时,龋坏部位暗黑,同时色素沉淀部位呈现出灰暗感,方便对相关病症进行准确定位分析;在 797 nm 光照时,所有病理特征消失,有利于牙齿整体轮廓方面的研究。

3 结论

本文提出用于生物医疗信息采集的多光谱均匀光源系统,其不仅可以提供均匀的多波段照明光源,还可兼容宽光谱和内窥镜应用。对于该多光谱系统,基于蒙特卡罗光线追迹法对积分球腔体的两种取位方式进行了研究,包括垂直取位方式和直线取位加挡板方式。基于两者的优缺点,选择直线取位加挡板方式对腔体大小、LED 布局 and 输出槽尺寸等结构参数进行了优化,实现了高辐照度均匀性。结果表明:当 LED 正对输出槽布置时,其辐照均匀性最佳;腔体大小和输出槽尺寸都影响着系统的均匀性和光学效率,在实际应用中应在均匀性和光学效率之间做出平衡。

基于优化的参数,构造了一个输出槽半径为 50 mm 的实物系统,以验证其光学性能。在 350 nm~800 nm 范围内集成了 11 种不同波段的 LED 用于多光谱数据采集,实例结果表明,所有波段都能在主要输出平面区域内实现 2% 辐照度不均匀性分布。此外,经过测试与分析,提出的系统不仅具有良好的辐照均匀度及宽光谱兼容能力,同时可在体外使用或兼容内窥镜使用,实现人体内部及外部多光谱数据的采集。在生物医疗领域对成本、多功能性且均匀性有较高要求的场合,该多光谱系统具有潜在的应用价值。

参考文献:

- [1] 华文深, 杨佳, 刘恂, 等. 基于高光谱特征的迷彩伪装评价[J]. 应用光学, 2013, 34(6): 964-967.
HUA Wenshen, YANG Jia, LIU Xun, et al. Camouflage assessment based on hyperspectral characteristics[J]. Journal of Applied Optics, 2013, 34(6): 964-967.
- [2] 戎念慈, 黄梅珍. 可见-近红外多光谱和多种算法模型融合的血迹年龄预测[J]. 光谱学与光谱分析, 2020, 40(1): 168-173.
RONG Nianci, HUANG Meizhen. Age estimation of bloodstains based on visible-near infrared multi-spectrum combined ensembling model[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2020, 40(1): 168-173.
- [3] 林富斌, 庞其昌, 马骥, 等. 光谱成像检测法鉴别中药材[J]. 应用光学, 2010, 31(2): 277-281.
LIN Fubin, PANG Qichang, MA Ji, et al. Identification of herbal medicines based on spectral imaging detection[J]. Journal of Applied Optics, 2010, 31(2): 277-281.
- [4] 陈键伟, 龚辉, 袁菁. 多光谱成像技术及其在生物医学中的应用[J]. 激光与光电子学进展, 2021, 58(4): 1-12.
CHEN Jianwei, GONG Hui, YUAN Jing. Multispectral imaging technology and its applications in biomedicine[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2021, 58(4): 1-12.
- [5] BEDARD N, SCHWARZ R A, HU A, et al. Multimodal snapshot spectral imaging for oral cancer diagnostics: a pilot study[J]. Biomedical Optics Express, 2013, 4(6): 938-949.
- [6] 廖乘胜, 曾立波, 吴琼水. 一种多波段光源的显微多光谱成像系统研究[J]. 光子学报, 2017, 46(11): 157-166.
LIAO Chengsheng, ZENG Libo, WU Qiongsui. Research of a microscopic spectral imaging system with multi-band illuminants[J]. Acta Photonica Sinica, 2017, 46(11): 157-166.
- [7] GAWAD A L A, EL-SHARKAWY Y, AYOUB H S, et al. Classification of dental diseases using hyperspectral imaging and laser induced fluorescence[J]. Photodiagnosis and Photodynamic Therapy, 2019, 25: 128-135.
- [8] 王成, 刘宾, 周楚, 等. 窄带LED照明的多光谱显微成像系统研究[J]. 中国激光, 2020, 47(12): 325-332.
WANG Cheng, LIU Bin, ZHOU Chu, et al. Study on multispectral microimaging system with narrowband LED illumination[J]. Chinese Journal of Lasers, 2020, 47(12): 325-332.
- [9] SAWYER T W, LUTHMAN A S, BOHNDIEK S E. Evaluation of illumination system uniformity for wide-field biomedical hyperspectral imaging[J]. Journal of Optics, 2017, 19(4): 045301.
- [10] UL REHMAN A, ANWER A G, GOLGYS E M. Programmable LED-based integrating sphere light source for wide-field fluorescence microscopy[J]. Photodiagnosis and Photodynamic Therapy, 2017, 20: 201-206.
- [11] 曾瑞敏, 王阳, 唐泽恬, 等. 一种环形屏积分球光源的辐照均匀度研究[J]. 应用光学, 2019, 40(4): 632-637.
ZENG Ruimin, WANG Yang, TANG Zetian, et al. Research on radiation uniformity of annular baffle integrating sphere light source[J]. Journal of Applied Optics,

- 2019, 40(4): 632-637.
- [12] ABOUGHALEB I H, AREF M H, EL-SHARKAWY Y H. Hyperspectral imaging for diagnosis and detection of ex-vivo breast cancer[J]. *Photodiagnosis and Photodynamic Therapy*, 2020, 31: 101922.
- [13] SHARMA N, HEFEEDA M. Hyperspectral reconstruction from RGB images for vein visualization[C]//Proceedings of the 11th ACM Multimedia Systems Conference. USA: ACM, 2020: 77-87.
- [14] JIN Z, XIONG D, DONG J, et al. Optical design of a compact multispectral LED light source with high irradiance and uniformity[J]. *Applied Optics*, 2019, 58(2): 317-324.
- [15] JEON S W, KIM S, CHOI J, et al. Optical design of dental light using a remote phosphor light-emitting diode package for improving illumination uniformity[J]. *Applied Optics*, 2018, 57(21): 5998-6003.
- [16] MARTINEZ-MANUEL L, PENA-CRUZ M I, VILLAMEDINA M, et al. A 17.5 kW el high flux solar simulator with controllable flux-spot capabilities: design and validation study[J]. *Solar Energy*, 2018, 170: 807-819.
- [17] ABUSEADA M, OPHOFF C, OZALP N. Characterization of a new 10 kW el high flux solar simulator via indirect radiation mapping technique[J]. *Journal of Solar Energy Engineering*, 2019, 141(2): 021005.
- [18] WANG Fuqiang, LIN Riyi, LIU Bin, et al. Optical efficiency analysis of cylindrical cavity receiver with bottom surface convex[J]. *Solar Energy*, 2013, 90: 195-204.
- [19] IEC. Photovoltaic devices-part 9: classification of solar simulator characteristics: IEC 60904-9: 2020[S]. Switzerland: IEC, 2020.
- [20] VACULA M, HORVATH P, CHYTKA L, et al. Use of a general purpose integrating sphere as a low intensity near-UV extended uniform light source[J]. *Optik*, 2021, 242: 167169.
- [21] 袁银麟, 郑小兵, 吴浩宇, 等. 大口径积分球参考光源的均匀性研究[J]. *光子学报*, 2015, 44(4): 160-166.
- YUAN Yinlin, ZHENG Xiaobin, WU Haoyu, et al. Uniformity research of integrating spheres reference light source with large exit aperture[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2015, 44(4): 160-166.
- [22] TAVAKOLI M, JAHANTIGH F, ZAROOKIAN H. Adjustable high-power-LED solar simulator with extended spectrum in UV region[J]. *Solar Energy*, 2021, 220: 1130-1136.
- [23] 倪俊雄, 白廷柱, 徐英莹. LED可变光谱光源的多光谱拟合反演研究[J]. *光谱学与光谱分析*, 2012, 32(6): 1606-1610.
- NI Junxiong, BAI Yanzhu, XU Yingying. The research on multi-spectral fitting of LED spectrum tunable light source[J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2012, 32(6): 1606-1610.
- [24] 邹文斌, 杨帆, 李兆申. 中国胃癌诊治关键在于提高早期诊断率[J]. *浙江大学学报(医学版)*, 2015, 44(1): 9-14.
- ZHOU Wenbin, YANG Fan, LI Zhaoshen. How to improve the diagnosis rate of early gastric cancer in China[J]. *Journal of Zhejiang University (Medical Sciences)*, 2015, 44(1): 9-14.
- [25] SOLTANI Z, BAGHDADI A, NEJADHOSSEINIAN M, et al. Gastrointestinal symptoms and upper endoscopy findings in systemic lupus erythematosus[J]. *European Journal of Gastroenterology & Hepatology*, 2021, 33(1S): e1078-e1079.
- [26] 马丽华, 李云霞, 蒙文, 等. 光纤通信系统[M]. 北京: 北京邮电大学出版社, 2009.
- MA Lihua, LI Yunxia, MENG Wen, et al. Optical fiber communications systems[M]. Beijing: Beijing University of Posts and Telecommunications Press, 2009.