

DOI: 10.19650/j.cnki.cjsi.J2007230

基于滤光轮双相机系统的高光谱分辨率成像^{*}

郁嘉恺, 赵巨峰, 崔光茫, 吴 超, 朱骏捷
(杭州电子科技大学电子信息学院 杭州 310018)

摘 要:滤光轮光谱成像系统在光谱成像领域应用广泛,空间分辨率高,但是光谱分辨率较低。针对这一问题,提出了基于滤光轮双相机系统的高光谱分辨率成像,设计了一种基于插分补偿的多光谱计算重构方法,实现系统的高光谱分辨率、高空间分辨率成像。首先利用滤光轮双相机成像系统采集多光谱图像以及 RGB 图像,然后从多光谱图像获取离散的光谱响应曲线,最后根据 RGB 三通道数据与光谱高维数据之间的映射关系以及能量守恒定理,进行光谱响应曲线的插分补偿并实现高光谱分辨率成像。实验结果表明,本文方法能够在保持空间分辨率的情况下,高效地实现光谱分辨率为 5 nm 甚至更高光谱分辨率的成像,重建结果与真实值的均方根误差为 0.017 1,具有较好的准确性和鲁棒性。

关键词: 光谱;高分辨率;滤光轮;双相机;能量守恒;插分补偿

中图分类号: TH744 O433 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.40

High spectral resolution imaging based on filter wheel dual camera system

Yu Jiakai, Zhao Jufeng, Cui Guangmang, Wu Chao, Zhu Junjie
(School of Electronics and Information, Hangzhou Dianzi University, Hangzhou 310018, China)

Abstract: The filter wheel-based spectral imaging system is widely used in spectral imaging, its spatial resolution is high, however, its spectral resolution is low. Aiming at this problem, a high spectral resolution imaging based on filter wheel dual camera system is introduced in this paper, meanwhile, a multi-spectral calculation and reconstruction method based on interpolation compensation is designed to achieve high spectral resolution and high spatial resolution imaging of the system. Firstly, the filter wheel dual camera imaging system is used to acquire the multi-spectral images and RGB images, and then the discrete spectral response curves are obtained from the multi-spectral images. Finally, according to the mapping relationship between the RGB three channel data and the spectral high-dimensional data, and the theorem of conservation of energy, the interpolation compensation of the spectral response curve is performed and the high spectral resolution imaging is achieved. Experiment results show that the proposed method can efficiently achieve the imaging with a spectral resolution of 5 nm even higher while maintaining the spatial resolution. The root mean square error between the reconstruction result and the true value is 0.017 1, the proposed method has high accuracy and robustness.

Keywords: spectrum; high resolution; filter wheel; dual cameras; energy conservation; interpolation compensation

0 引 言

人类能够通过颜色感知世界,这是因为人类视觉系统中的视锥细胞将可见光谱中的光进行转换。以 RGB 颜色格式捕获的图像非常适合人类,因为它们是人类视觉系统所熟悉的格式,而光谱成像技术可以记录自然场

景光线在不同波段的反射响应,记录一些 RGB 图像很难反应的物质物理化学特性,例如目标的材质、形貌、表面光滑度等中高属性特征,因此光谱成像技术在遥感^[1]、军事侦察^[2]、医疗诊断^[3]、农业生产^[4]以及计算影像学^[5]等领域都有重大的应用前景。

传统的光谱成像技术主要有:色散型、干涉型、滤光片型。色散型成像光谱仪使用的色散元件有棱镜和光

收稿日期:2020-12-11 Received Date: 2020-12-11

^{*} 基金项目:浙江省自然科学基金(LY18F050007)、浙江省基础公益研究计划项目(LGF20F050003)、浙江省科协“育才工程”项目(SKX201901)、国家自然科学基金(61805063)项目资助

栅,色散光谱仪具有结构简单的特点,但是其分辨率和光通量是两个对立的参数,为了提高光谱分辨率,不得不牺牲色散光谱仪的光通量,依据色散光谱仪的成像特点,美国杜克大学 Brady 教授首次将压缩感知理论的思想引入光谱采集中,提出了一种编码光圈式光谱成像系统(coded aperture snapshot spectral imaging, CASSI)^[6-7],南京大学的曹汛教授提出了一种棱镜掩膜式光谱成像系统(prism-mask multispectral video imaging system, PMVIS)^[8-10]。不同于色散光谱仪,干涉光谱仪^[11]具有光通量高的特点,但是干涉光谱仪包含扫描动镜结构,很小的震动就可能引入较大的成像误差,结构稳定性较差。滤光片型光谱仪^[12-14]的实现方案有很多,其中可调谐滤光片法以及滤光片物理转轮法使用较为广泛。滤光片物理转轮法的具体表现形式是滤光轮结构,控制滤光轮的转动,可以获取不同波长的窄带滤光片作用下的光谱图像,并且光谱图像具有较高的空间分辨率,保留了大量的空间信息,但是同样有很大的局限性,一方面,其得到的光谱图像的光谱信息较有限,只能得到离散的光谱响应曲线,光谱分辨率较低;另一方面,滤光轮的转动带来了时间损耗,致使滤光轮光谱成像系统不具备实时性。

为了解决低光谱分辨率的问题, Ayala 等^[15]使用来自表面反射光谱的三刺激值,通过使用 3 个特征向量计算光谱的主成分,主成分的获取需要大量的数据集。Abed 等^[16]提出了一种利用局部线性插分补偿的方法,用三刺激值来估计反射率曲线,但是局部插分补偿方法适用于处理较大数据集,并且对数据修改的敏感度较低。

本文提出了一种利用双相机成像原理以及 RGB 图像信息实现高光谱分辨率成像的方法,设计了无需通过学习构建 RGB 三通道到光谱高维数据的映射关系的方法,在能量守恒的前提下,采用基于滤光轮双相机的插分补偿实现高光谱分辨率成像的算法(high spectral resolution imaging using interpolation compensation based on filter wheel dual cameras, SHRIC-FWDC),其基本思想是 RGB 图像中包含着相机三通道积分曲线的信息,而相机三通道积分曲线与光谱响应曲线反映意义相同的物理量,建立两者的对应关系,最后进行插分补偿运算得到高分辨率的光谱响应曲线,实现光谱维度的高分辨率成像。并通过优化滤光轮控制系统,使得本文光谱成像系统的时间分辨率达到 0.1 s,系统的时间效率进一步提升。

1 基本原理

1.1 滤光轮双相机成像系统

滤光轮双相机成像系统的基本原理是利用分光镜的分光作用,将自然光分为透射光线以及反射光线,并且两

路光线分得的能量均为入射光总能量的 50%,其中透射光线进入滤光轮光谱图像采集系统,反射光线进入 RGB 图像采集系统,实现双相机成像,分别获取光谱图像以及 RGB 图像。

如图 1 所示,文中的滤光轮双相机成像系统由 6 片窄带滤光片、滤光轮、分光镜、灰度相机和 RGB 相机组成。

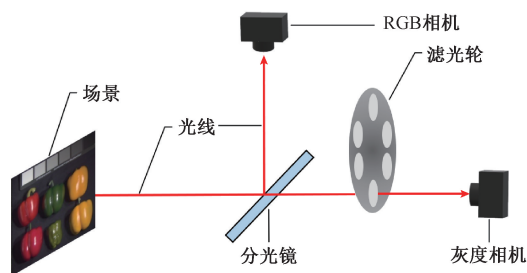


图1 滤光轮双相机成像系统

Fig. 1 Filter wheel dual camera imaging system

来自自然场景的入射光线通过分光镜分为透射光线和反射光线两路光线,其中透射光线经过嵌入在滤光轮中的窄带滤光片,被灰度相机捕获形成光谱图像;反射光线被 RGB 相机捕获形成高分辨率 RGB 图像。利用滤光轮控制系统控制滤光轮的旋转速度为 20π rad/s,并设置与滤光轮的旋转速度匹配的灰度相机图像采集时间间隔为 $1/60$ s,以保证多光谱图像采集的效率,滤光轮双相机成像系统获取一组光谱图像的时间为 0.1 s。同时,通过调节光学元件之间的相对位置,保证所有光学元件都在同一个光路上,避免实验装置产生的额外能量损耗,并保证双相机具有相同的视场,提高滤光轮双相机成像系统的算法效率。

该滤光轮双相机成像系统获得的多光谱图像通过计算得到离散的光谱响应曲线,并且 RGB 图像在高光谱分辨率成像中同样起着重要的作用。利用 RGB 图像包含的 R、G、B 准确信息对该系统获得的光谱响应曲线进行插分补偿重建,实现高光谱分辨率成像。

1.2 光谱响应曲线分析

光谱响应曲线是反映光谱信息的一种重要方式,反映在特定光强度下,不同波长的光照射灰度相机时,灰度相机吸收的能量与波长之间的关系,光谱响应曲线一般由两列数据组成,一列数据是波长,另一列数据是相对响应强度(最大值为 1)。

光谱图像是自然光线经过窄带滤光片采集得到的,既包含二维数字图像信息又有精确光学波长信息。窄带滤光片具有很窄的可见光波段可通过性,因此经窄带滤光片采集的光谱图像在光谱响应曲线上的映射是离散的点。滤光轮光谱成像系统中窄带滤光片波段和数量都是

有限的,所以通过滤光轮光谱成像系统得到的光谱响应曲线是离散的,光谱分辨率低。

相机的 RGB 三通道积分曲线的物理意义与光谱响应曲线相同,反映的是相机的 R、G、B 3 个通道对不同波长光的相对响应强度。相机的 RGB 三通道积分曲线如图 2 所示。

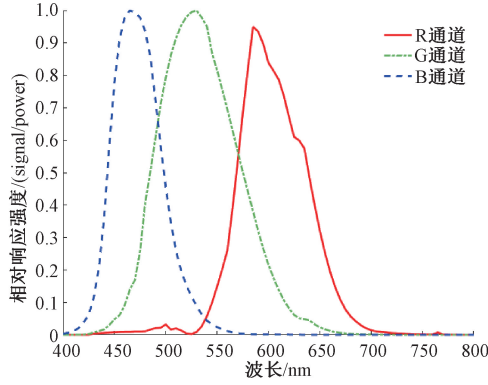


图2 相机的 RGB 三通道积分曲线

Fig. 2 The RGB three channel integral curves of the camera

并且相机的 RGB 三通道积分曲线与 RGB 图像上像素点的 R、G、B 值有如下的对应关系:

$$\begin{cases} R = 255 \times \left(\int_0^{R_1} \vec{r}_c(\lambda) d\lambda / \int_0^\infty \vec{r}_c(\lambda) d\lambda \right) \\ G = 255 \times \left(\int_0^{G_1} \vec{g}_c(\lambda) d\lambda / \int_0^\infty \vec{g}_c(\lambda) d\lambda \right) \\ B = 255 \times \left(\int_0^{B_1} \vec{b}_c(\lambda) d\lambda / \int_0^\infty \vec{b}_c(\lambda) d\lambda \right) \end{cases} \quad (1)$$

式中: R 、 G 、 B 分别为 RGB 图像的三通道值; $\vec{r}_c(\lambda)$ 、 $\vec{g}_c(\lambda)$ 、 $\vec{b}_c(\lambda)$ 分别表示相机的 R 通道积分曲线、G 通道积分曲线、B 通道积分曲线; R_1 、 G_1 、 B_1 分别表示相机的 R 通道积分曲线、G 通道积分曲线、B 通道积分曲线横轴上的取值; λ 是相机的 R 通道积分曲线、G 通道积分曲线、B 通道积分曲线的横轴,表示波长。

RGB 图像的三通道值 R 、 G 、 B 是 RGB 图像中的已知量,且 R 、 G 、 B 的取值范围为 $[0, 255]$,则待测量 R_1 、 G_1 、 B_1 的值可由式(1)求得。

设曲线 $\vec{r}_c(\lambda)$ 在横轴为 0 到 R_1 范围内部分的曲线为 $\vec{r}'_c(\lambda)$ 、曲线 $\vec{g}_c(\lambda)$ 在横轴为 0 到 G_1 范围内部分的曲线为 $\vec{g}'_c(\lambda)$ 、曲线 $\vec{b}_c(\lambda)$ 在横轴为 0 到 B_1 范围内部分的曲线为 $\vec{b}'_c(\lambda)$,曲线 $\vec{r}'_c(\lambda)$ 、 $\vec{g}'_c(\lambda)$ 、 $\vec{b}'_c(\lambda)$ 可以表示为:

$$\begin{cases} \vec{r}'_c(\lambda) = \vec{r}_c(\lambda), \lambda \in [0, R_1] \\ \vec{g}'_c(\lambda) = \vec{g}_c(\lambda), \lambda \in [0, G_1] \\ \vec{b}'_c(\lambda) = \vec{b}_c(\lambda), \lambda \in [0, B_1] \end{cases} \quad (2)$$

1.3 基于能量守恒建立映射关系

通过构建 RGB 值和对应的光谱响应之间的映射,能够有效地实现高光谱分辨率成像,现有的有效方法主要有遗传算法、模拟退火、主成分分析法^[17-18]以及基于学习的方法^[19]等。其中基于学习的方法有比较好的效果,主要包括径向基函数^[20]、稀疏编码^[21]和卷积神经网络^[22-24]。而基于学习的方法需要大量的数据集,并对光源以及环境有较高的要求,改变光源及环境存在数据库不准确的可能。

本文方法依据能量守恒定律,建立 RGB 三通道与高维光谱数据之间的映射关系。对自然光透过滤光轮光谱成像系统中的不同波段的窄带滤光片的光谱图像采集结果与 RGB 相机对自然场景的图像采集结果进行能量匹配,使得光谱图像与 RGB 图像的能量守恒。窄带滤光片滤除了大部分波段的可见光,只有波长有限的可见光波段可以通过窄带滤光片,这就导致了采集光谱图像的灰度相机的 CMOS 元件吸收的光子能量大大减少,而 RGB 相机进行图像采集时,不会存在类似于光谱图像采集时滤光轮带来的能量损耗,因此光谱图像与 RGB 图像存在能量不匹配的现象,对光谱图像与 RGB 图像进行能量匹配,为后续进行插补补偿实现高分辨率光谱成像做准备。

建立光谱响应曲线与相机的 R、G、B 三个通道积分曲线的对应关系是进行插补补偿实现高分辨率光谱成像的关键。设窄带滤光片的中心波长为 ω ,自然光透过滤光轮光谱成像系统上中心波长为 ω 的窄带滤光片采集得到分辨率为 $M \times N$ 的光谱图像 I_s 、 I_s 上的像素点 (i, j) 对应的的光谱响应值可以表示为:

$$re_{\omega, i, j} = [r_{\omega, i, j} \quad g_{\omega, i, j} \quad b_{\omega, i, j}] [x \quad y \quad z]^T \quad (3)$$

式中: $re_{\omega, i, j}$ 表示光谱响应值; $r_{\omega, i, j}$ 、 $g_{\omega, i, j}$ 、 $b_{\omega, i, j}$ 分别表示相机的 R、G、B 3 个通道的积分曲线上 ω 波长对应的值, x 、 y 、 z 是 3 个常数,分别表示 $r_{\omega, i, j}$ 、 $g_{\omega, i, j}$ 、 $b_{\omega, i, j}$ 的权重, $[x \quad y \quad z]^T$ 是 $re_{\omega, i, j}$ 值与 $r_{\omega, i, j}$ 、 $g_{\omega, i, j}$ 、 $b_{\omega, i, j}$ 值之间的变换矩阵,上标 T 表示矩阵转置。

设滤光轮光谱成像系统中六片窄带滤光片的中心波长 ω 分别为 ω_1 、 ω_2 、 ω_3 、 ω_4 、 ω_5 、 ω_6 ,则有:

$$\begin{bmatrix} re_{\omega_1, i, j} \\ re_{\omega_2, i, j} \\ \vdots \\ re_{\omega_6, i, j} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r_{\omega_1, i, j} & g_{\omega_1, i, j} & b_{\omega_1, i, j} \\ r_{\omega_2, i, j} & g_{\omega_2, i, j} & b_{\omega_2, i, j} \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ r_{\omega_6, i, j} & g_{\omega_6, i, j} & b_{\omega_6, i, j} \end{bmatrix} [x \quad y \quad z]^T \quad (4)$$

设矩阵 $A = \begin{bmatrix} r_{\omega_1, i, j} & g_{\omega_1, i, j} & b_{\omega_1, i, j} \\ r_{\omega_2, i, j} & g_{\omega_2, i, j} & b_{\omega_2, i, j} \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ r_{\omega_6, i, j} & g_{\omega_6, i, j} & b_{\omega_6, i, j} \end{bmatrix}$, 矩阵 $B = \begin{bmatrix} re_{\omega_1, i, j} \\ re_{\omega_2, i, j} \\ \vdots \\ re_{\omega_6, i, j} \end{bmatrix}$, 矩

阵 $X = [x \quad y \quad z]^T$, 则式(4)简化为: $B = AX$ 。定义损失

函数 $S(X)$ 计算公式为:

$$S(X) = \sum_{n=1}^6 (re_{\omega_n, i, j} - \hat{re}_{\omega_n, i, j})^2 \quad (5)$$

式中: $re_{\omega_n, i, j}$ 表示实际测得的值; $\hat{re}_{\omega_n, i, j}$ 表示光谱响应理论值, 并且有:

$$\hat{re}_{\omega_n, i, j} = [r_{\omega_n, i, j} \quad g_{\omega_n, i, j} \quad b_{\omega_n, i, j}] [x \quad y \quad z]^T \quad (6)$$

则式(5)可以表示为:

$$S(X) = (B - AX)^T (B - AX) \quad (7)$$

损失函数 $S(X)$ 的值最小时, 表示变换矩阵 $[x \quad y \quad z]^T$ 取得最优解, 即光谱图像与 RGB 图像之间的能量匹配误差最小, 建立起 RGB 三通道与高维光谱数据之间的映射关系。

1.4 高光谱分辨率重建

变换矩阵中的 x, y, z 值分别作为曲线 $\vec{r}'_c(\lambda)$ 、 $\vec{g}'_c(\lambda)$ 、

$\vec{b}'_c(\lambda)$ 上采样点的权重, 基于 3 条曲线进行光谱响应曲线的插分补偿实现高光谱分辨率重建。对曲线 $\vec{r}'_c(\lambda)$ 、 $\vec{g}'_c(\lambda)$ 、 $\vec{b}'_c(\lambda)$ 每隔 $\Delta\lambda$ 进行采样, 并且 $\Delta\lambda$ 趋近于 0, 记采样点对应的波长为 λ_s , 3 条曲线上对应的采样点为 $\vec{r}'_c(\lambda_s)$ 、 $\vec{g}'_c(\lambda_s)$ 、 $\vec{b}'_c(\lambda_s)$, 采样点 $\vec{r}'_c(\lambda_s)$ 、 $\vec{g}'_c(\lambda_s)$ 、 $\vec{b}'_c(\lambda_s)$ 经变换矩阵, 重建出光谱响应曲线在波长为 λ_s 处的光谱响应值, 即完成对滤光轮光谱成像系统得到的离散的光谱响应曲线的插分补偿, 实现高光谱分辨率重建, 且光谱分辨率为 $\Delta\lambda$, 其中 λ_s 波长处的光谱响应值为:

$$re_{\lambda_s}(i, j) = x \times \vec{r}'_c(\lambda_s) + y \times \vec{g}'_c(\lambda_s) + z \times \vec{b}'_c(\lambda_s) \quad (8)$$

对于一组已知的 RGB 图像和多光谱图像, 根据本文算法可实现每隔 $\Delta\lambda$ 波长重建光谱图像, 即实现光谱分辨率为 $\Delta\lambda$ 的光谱重建, 算法实现示意图如图 3 所示。

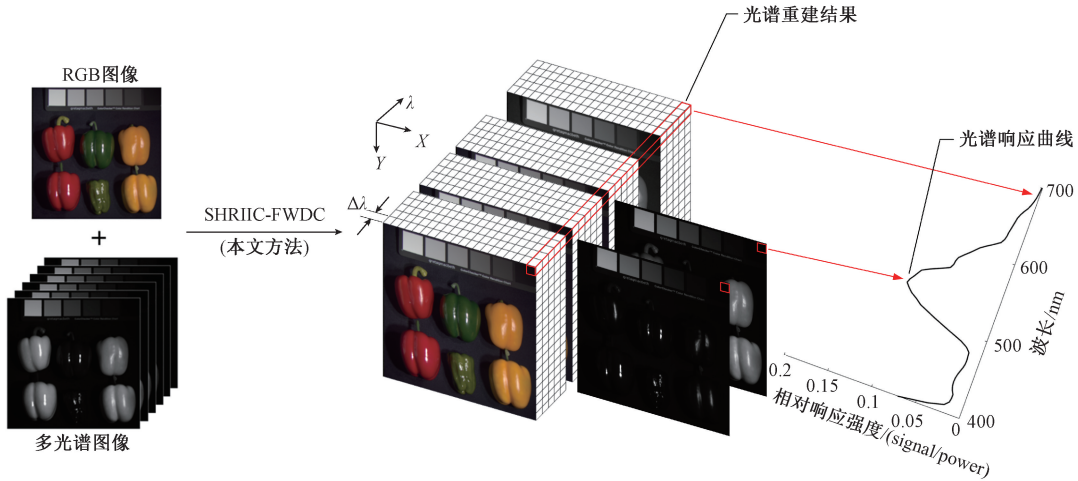


图3 算法实现示意图

Fig. 3 The schematic diagram of the algorithm implementation

2 实验论证与分析

2.1 实验设置

本节的实验论证一采用哥伦比亚大学 CAVE 实验室建立的多光谱图像数据库进行实验论证, 该数据库使用 Apogee Alta U260 相机对 32 个场景进行光谱图像采集, 每个场景包含 31 幅光谱图像以及 1 幅 RGB 图像, 其中光谱图像是 400~700 nm 光谱区间内每隔 10 nm 采集得到的, 数据真实可靠, 符合实际情况, 适用于本节实验^[25]; 实验论证二使用滤光轮双相机成像系统进行图像采集, 数据真实可靠。

实验论证一将设置多组对比方法验证。从离散的光谱响应曲线出发, 直接根据离散点进行插分补偿的方法有: 三次样条插值 Spline^[26] 以及三阶 Hermite 插值

Pchip^[27] 等。从建立 RGB 三通道与高维光谱数据之间的映射关系角度出发, 径向基函数、稀疏编码和卷积神经网络等基于学习的方法, 需要大量数据进行学习建立查找表, 本节实验数据有限, 则上述基于学习的方法不适用于本节实验。

实验论证一设置评价算法准确性的指标为均方根误差 (root mean square error, RMSE) 以及平均相对绝对误差 (mean relative absolute error, MRAE), 并有:

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{m} \sum_{i=1}^m (r_i - w_i)^2} \quad (9)$$

$$MRAE = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m \frac{|r_i - w_i|}{r_i} \quad (10)$$

式中: m 表示光谱数据点的总数; r_i 表示光谱真实数据; w_i 表示对应的重建光谱数据。

2.2 实验论证一

1) 实验结果

选取 CAVE 数据库中其中一个场景进行算法论证,并选取如图 4 所示的 400、450、500、550、600、650 nm 6 个波长的光谱图像以及如图 5 所示的 RGB 图像模拟滤光轮双相机成像系统获取的多光谱图像,得到离散的光谱响应曲线,并通过 SHRIIC-FWDC 算法重建出光谱响应曲线,通过对比分析,验证算法的准确性和鲁棒性。

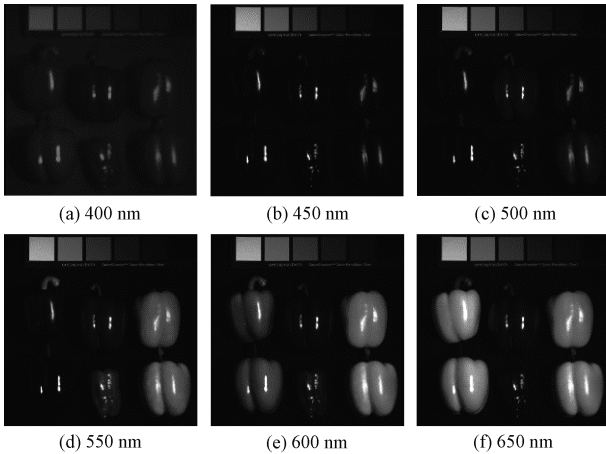


图 4 数据集中的光谱图像

Fig. 4 Spectral images in the dataset

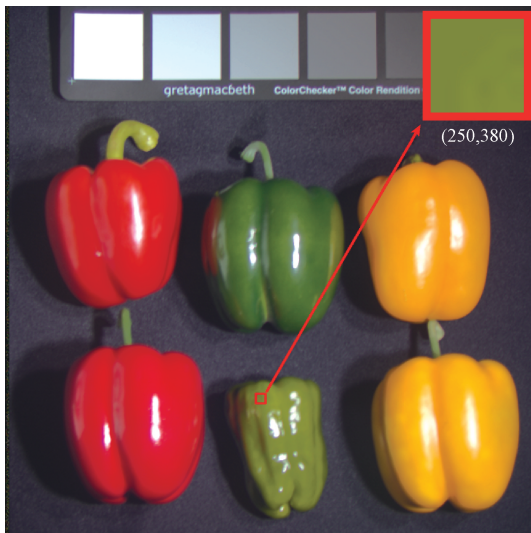


图 5 数据集中的 RGB 图像

Fig. 5 RGB images in the dataset

把图 5 中方框选中的像素点作为实验论证的依据,且选中的像素点坐标为(250,380)。对图 4 中 6 幅光谱图像中与图 5 方框选中的点位置相同的点求取光谱响应值,得到离散的光谱响应曲线,如图 6 所示。

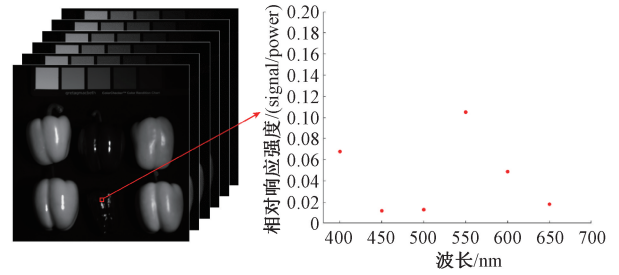


图 6 获取离散光谱响应曲线

Fig. 6 Acquisition of the discrete spectral response curve

使用本文提出的 SHRIIC-FWDC 方法实现高光谱分辨率成像,并取 $\Delta\lambda = 5$ nm,结果如图 7 中实线所示,数据库对应的真实值如图 7 中离散点所示。从结果来看,本文方法在 700 nm 附近时偏离真实值,原因是相机存在硬件限制,当波长在 700 nm 附近时,相机趋近于截止状态。

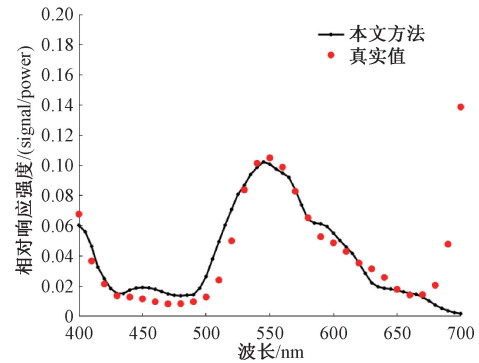


图 7 SHRIIC-FWDC 方法重建的光谱响应曲线

Fig. 7 Spectral response curve reconstructed with SHRIIC-FWDC method

2) 准确性对比分析

引入三次样条插值 Spline 方法以及三阶 Hermite 插值 Pchip 方法进行准确性对比分析,如图 8 所示。

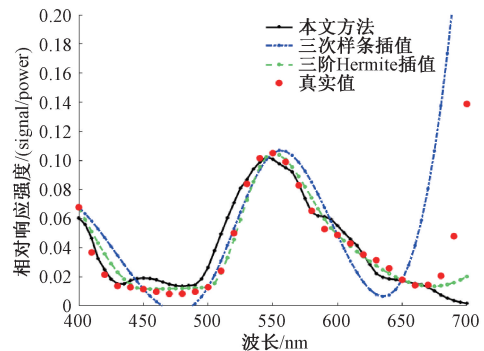


图 8 面向准确性分析的光谱响应曲线对比

Fig. 8 Comparison of spectral response curves for accuracy analysis

为了客观分析并评价插分补偿重建结果,使用均方根误差 $RMSE$ 和平均相对绝对误差 $MRAE$ 作为不同方法的客观评价指标,不同方法的客观评价结果如表 1 所示。

表 1 准确性分析中不同方法的客观评价结果
Table 1 Objective evaluation result of different methods in accuracy analysis

方法	波长/nm	$RMSE$	$MRAE$
SHRIIC-FWDC	400~700	0.017 1	0.349 9
	680~700	0.083 4	0.848 5
	400~670	0.008 4	0.296 4
三次样条插值	400~700	0.051 5	0.931 3
	680~700	0.155 7	3.476 7
	400~670	0.018 6	0.658 5
三阶 Hermite 插值	400~700	0.022 7	0.301 4
	680~700	0.071 0	0.616 0
	400~670	0.015 7	0.267 7

本节实验中,使用 SHRIIC-FWDC 方法得到的结果与真实值之间的均方根误差 $RMSE$ 为 0.017 1,重建效果较好,但是仍存在误差,存在误差的原因主要是本节实验中只有 6 个原始数据点,数据有限,不可避免地丢失一些细节。并且 680~700 nm 误差较大,原因在于相机的硬件限制,相机对可见光波段具有相对高的灵敏度,但是相机捕获上述波段的光波时,相机灵敏度下降,相机趋于截止状态。自然场景中的物体在非可见光波段仍有较高的光谱响应值,导致相机截止误差的存在。本文方法在 400~670 nm 均方根误差以及平均相对绝对误差均较小,即在该波段内有很好的效果。与分段线性插值、球面插值以及三次多项式插值不同,本文方法的插分补偿点具有独立性,只与当前点有关,与相邻的点无关,因此不会受光谱响应曲线中其他插分补偿点引入误差的影响,算法鲁棒性以及准确性较高。

3) 鲁棒性对比分析

已知上述准确性对比分析中选取了 400、450、500、550、600 以及 650 nm 6 个均匀采样波长的光谱图像进行实验分析,与采用非均匀采样的 6 个波长的光谱图像进行算法鲁棒性对比分析,本节选取 400、420、540、560、600 以及 650 nm 6 个波长的光谱图像进行实验分析,SHRIIC-FWDC 方法、三次样条插值 Spline 方法以及三阶 Hermite 插值 Pchip 方法插分补偿的结果如图 9 所示。

鲁棒性对比分析中 3 种方法的客观评价结果如表 2 所示。

由表 2 可以得出,SHRIIC-FWDC 方法插分补偿重建

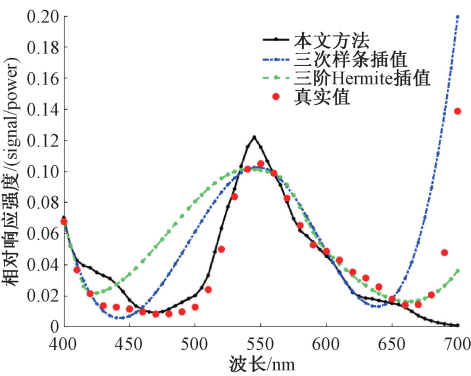


图 9 面向鲁棒性分析的光谱响应曲线对比

Fig. 9 Comparison of spectral response curves for robustness analysis

表 2 鲁棒性分析中不同方法的客观评价结果
Table 2 Objective evaluation result of different methods in robustness analysis

方法	波长/nm	$RMSE$	$MRAE$
SHRIIC-FWDC	400~700	0.027 6	0.382 6
	680~700	0.084 3	0.921 0
	400~670	0.008 9	0.324 9
三次样条插值	400~700	0.030 1	0.923 5
	680~700	0.073 9	1.877 0
	400~670	0.020 4	0.821 3
三阶 Hermite 插值	400~700	0.032 5	1.178 4
	680~700	0.060 5	0.399 3
	400~670	0.027 9	1.261 8

结果的 $RMSE$ 和 $MRAE$ 与表 1 中的对应数据没有较大的偏差;而在表 2 中,三次样条插值 Spline 方法以及三阶 Hermite 插值 Pchip 方法插分补偿重建结果的 $RMSE$ 和 $MRAE$ 较大,表明光谱响应曲线与真实值有较大的误差,与表 1 中对应数据存在较大的偏差,鲁棒性较差。

4) 算法普适性分析

为了验证本文方法的普遍适用性,选取与 2.2 节中 1) 的像素点不同的像素点进行结果分析,选取坐标为 (65,180) 和 (380,185) 的两个像素点进行实验分析。如图 10 所示,RGB 图像中, (65,180) 和 (380,185) 两个像素点处与 2.2 节 1) 中选取的像素点在 RGB 值上有较大的区分度,更能说明本文方法的普遍适用性。

如图 10(b)、(c) 所示,本节选取的不同采样像素点的重建结果同样符合本文方法的一般特征,除波长接近 700 nm 时相机趋近截止状态从而引入较大误差外,利用本文方法重建得到的光谱响应曲线具有较好的效果,由此可知本文方法有一定的普适性。

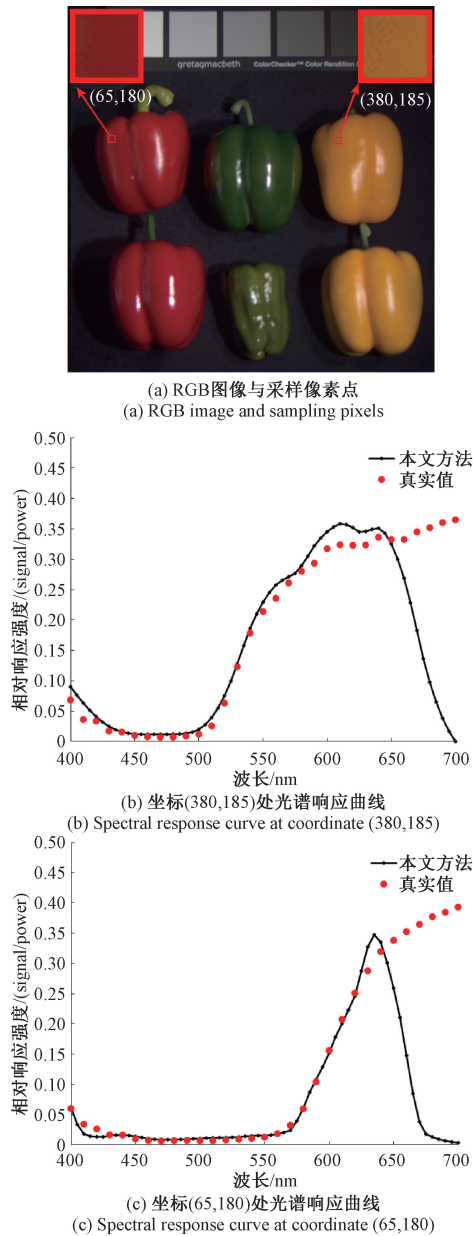


图 10 不同采样像素点的重建结果
Fig. 10 Reconstruction results for different sampling pixels

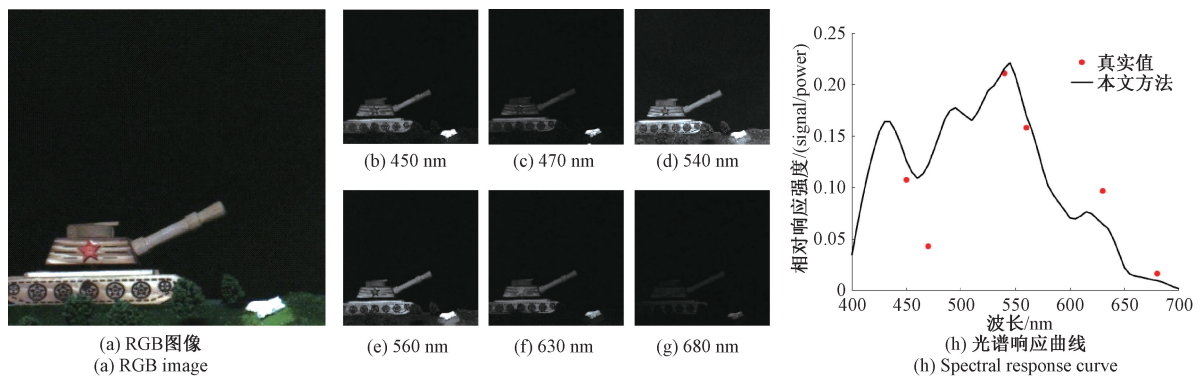


图 13 木质目标实验结果
Fig. 13 Experiment results of a wooden object

2.3 实验论证二

本节实验使用如图 11 所示的滤光轮双相机成像系统,系统包括 RGB 相机、灰度相机、分光镜、滤光轮以及 6 片滤光片,对如图 12 所示的实验场景进行实验数据获取,其中 RGB 相机获取 1 幅 RGB 图像,灰度相机分别获取中心波长为 450、470、540、560、630、680 nm 的光谱图像。

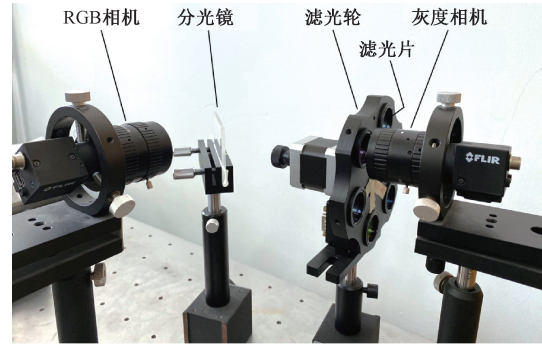


图 11 滤光轮双相机成像系统
Fig. 11 Filter wheel dual camera imaging system



图 12 实验场景
Fig. 12 Experiment scene

利用本文的 SHRIIC-FWDC 方法实现高光谱分辨率成像,图 13~15 分别是木质目标、铁质目标、塑料材质目标对应的 RGB 图像、多光谱图像以及使用 SHRIIC-FWDC 方法得到的高分辨率光谱响应曲线。

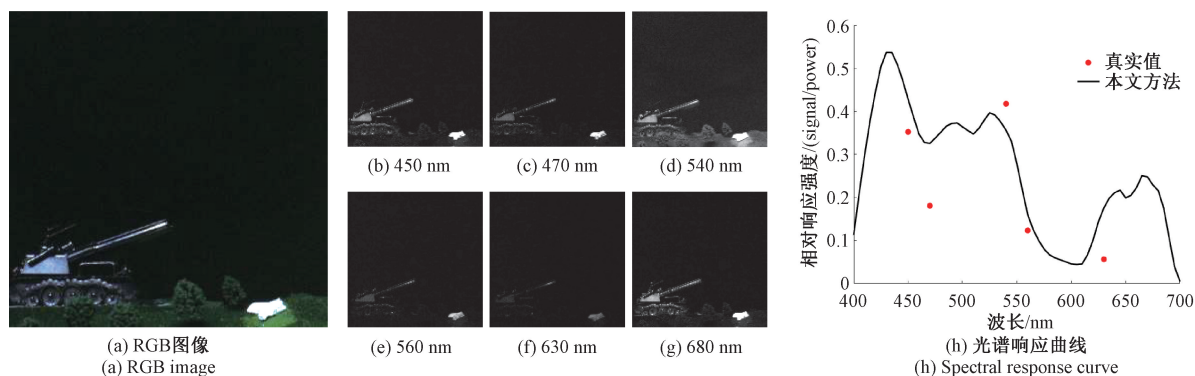


图14 铁质目标实验结果

Fig. 14 Experiment results of an iron object

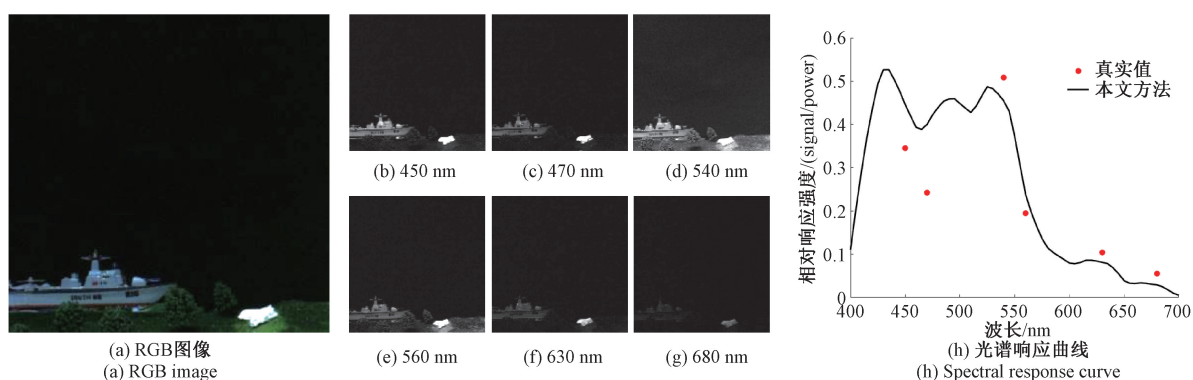


图15 塑料材质目标实验结果

Fig. 15 Experiment results of a plastic object

实验论证二基于实际拍摄,由图13(h)、14(h)以及图15(h)的光谱响应曲线可知,本文方法具有较好的重建效果,470 nm处虽然光谱响应曲线趋势与实际一致,但是误差显著大于其他波长处,原因在于:450与470 nm波长接近,但是光谱响应值存在较大差异,能量匹配存在一定误差,光谱响应曲线的重建结果在保证光谱总体特征准确的情况下,不可避免地存在一些细节特征的丢失。在未来研究中,进一步改进匹配方法以减小误差。

在使用本文的滤光轮双相机成像系统进行实际拍摄时,较难获取用于进行准确性与鲁棒性分析的数据量较大的实验数据,所以目前在实验论证二中无法实现准确性与鲁棒性的分析,预计增设实验的光谱波段数,获得数据量更大的实验数据,进一步分析算法准确性和鲁棒性。

3 结 论

本文提出的基于滤光轮双相机系统的高光谱分辨率成像算法,由原始的数量极其有限的点组成的稀疏的光谱响应曲线重建出高分辨率的光谱响应曲线,与现有的基于学习的高光谱分辨率成像算法相比,算法结构

简单,无需大量数据进行学习,并有较好的重建效果,可广泛应用于光谱成像系统中。

本文的不足之处在于,一方面,没有考虑到实验研究中的一些系统误差,例如相机的硬件限制,会造成结果的误差,后期可以考虑结合相机的系统矫正,将本文提出的算法进行优化;另一方面,可以增设实验的光谱波段数,获取数据量更大的实验数据,形成自己的数据库,进一步分析算法准确性与鲁棒性。这些方法上的改进都是今后研究的主要方向。

参考文献

- [1] DADON A, MANDELMILCH M, BEN-DOR E, et al. Sequential PCA-based classification of mediterranean forest plants using airborne hyperspectral remote sensing[J]. Remote Sensing, 2019, 11(23): 2800.
- [2] SCHWARTZ C R, EISMANN M T, CEDERQUIST J N, et al. Thermal multispectral detection of military vehicles in vegetated and desert backgrounds[J]. Proc. of SPIE, 1996, 2742: 289-297.
- [3] 张朕,姜劲,傅嘉豪,等. 基于功能近红外光谱的多生理脑力疲劳检测[J]. 仪器仪表学报, 2017, 38(6):

- 1345-1352.
- ZHANG ZH, JIANG J, FU J H, et al. Multi-physiological mental fatigue detection based on functional near-infrared spectroscopy [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2017, 38(6): 1345-1352.
- [4] 董晶晶, 吴静珠, 刘倩, 等. 小麦不完善粒的高光谱图像检测方法研究[J]. 电子测量与仪器学报, 2017, 31(7): 1074-1080.
- DONG J J, WU J ZH, LIU Q, et al. Research on hyperspectral image detection method of imperfect wheat grains [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2017, 31(7): 1074-1080.
- [5] IEHL J C, PÉROCHE B. An adaptive spectral rendering with a perceptual control[J]. Computer Graphics Forum, 2010, 19(3): 291-300.
- [6] KITTLE D, CHOI K, WAGADARIKAR A, et al. Multiframe image estimation for coded aperture snapshot spectral imagers[J]. Applied Optics, 2010, 49(36): 6824-6833.
- [7] LIN X, WETZSTEIN G, LIU Y, et al. Dual-coded compressive hyperspectral imaging[J]. Optics Letters, 2014, 39(7): 2044-2047.
- [8] CAO X, DU H, TONG X, et al. A prism-mask system for multispectral video acquisition[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis & Machine Intelligence, 2011, 33(12): 2423-2435.
- [9] 陈林森. 多光谱视频成像系统与算法研究[D]. 南京: 南京大学, 2017.
- CHEN L S. Research on multispectral video imaging system and algorithm[D]. Nanjing: Nanjing University, 2017.
- [10] 字崇德, 李昀谦, 祖永祥, 等. 多传感器光谱视频成像系统中的图像对齐研究[J]. 红外与激光工程, 2019, 48(6): 276-283.
- ZI CH D, LI Y Q, ZU Y X, et al. Research on image alignment in multi-sensor spectral video imaging system[J]. Infrared and Laser Engineering, 2019, 48(6): 276-283.
- [11] ZHANG W, WEN D, SONG Z. Spectrum reconstruction in interference spectrometer based on sparse Fourier transform[J]. Optik, 2018, 154: 157-164.
- [12] YAMAGUCHI M, HANEISHI H, FUKUDA H, et al. High-fidelity video and still-image communication based on spectral information: Natural vision system and its applications[C]//Spectral Imaging: Eighth International Symposium on Multispectral Color Science, International Society for Optics and Photonics, 2006, 6062: 60620G.
- [13] 王颖. 滤光片型光谱成像技术研究[D]. 长春: 中国科学院研究生院(长春光学精密机械与物理研究所), 2015.
- WANG Y. Research on filter-type spectral imaging technology[D]. Changchun: Graduate School of Chinese Academy of Sciences (Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics), 2015.
- [14] 廖乘胜, 吴正, 曾立波, 等. 基于多通道窄带滤光片和彩色图像传感器的实时多光谱成像系统[J]. 光子学报, 2017, 46(4): 100-108.
- LIAO CH SH, WU ZH, ZENG L B, et al. Real-time multi-spectral imaging system based on multi-channel narrow-band filter and color image sensor [J]. Acta Photonica Sinica, 2017, 46(4): 100-108.
- [15] AYALA F, ECHÁVARRI J F, RENET P, et al. Use of three tristimulus values from surface reflectance spectra to calculate the principal components for reconstructing these spectra by using only three eigenvectors [J]. Journal of the Optical Society of America A, 2006, 23(8): 2020-2026.
- [16] ABED F M, AMIRSHAHI S H, ABED M R M. Reconstruction of reflectance data using an interpolation technique[J]. JOSA A, 2009, 26(3): 613-624.
- [17] AGAHIAN F, AMIRSHAHI S A, AMIRSHAHI S H. Reconstruction of reflectance spectra using weighted principal component analysis [J]. Color Research and Application, 2008, 33(5): 360-371.
- [18] ARAD B, BEN-SHAHAR O. Sparse recovery of hyperspectral signal from natural RGB images [C]. European Conference on Computer Vision, Springer, Cham, 2016: 19-34.
- [19] FUBARA B J, SEDKY M, DYKE D. RGB to spectral reconstruction via learned basis functions and weights[C]. 2020 IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition Workshops (CVPRW), IEEE, 2020: 1984-1993.
- [20] NGUYEN R M H, PRASAD D K, BROWN M S. Training-based spectral reconstruction from a single RGB image [C]//European Conference on Computer Vision, Springer, Cham, 2014: 186-201.
- [21] YING F, ZHENG Y, LIN Z, et al. Spectral reflectance recovery from a single RGB image [J]. IEEE Transactions on Computational Imaging, 2018, 4(3): 382-394.
- [22] XIONG Z, SHI Z, LI H, et al. HSCNN: CNN-based hyperspectral image recovery from spectrally undersampled projections [C]. IEEE International Conference on Computer Vision Workshop, IEEE Computer Society, 2017: 518-525.
- [23] SHI Z, CHEN C, XIONG Z, et al. HSCNN+: Advanced CNN-based hyperspectral recovery from RGB images[C].

- 2018 IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition Workshops (CVPRW), IEEE, 2018: 1052-1060.
- [24] STIEBEI T, KOPPERS S, SELTSAM P, et al. Reconstructing spectral images from RGB-images using a convolutional neural network [C]. 2018 IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition Workshops (CVPRW), IEEE, 2018:1061-1066.
- [25] YASUMA F, MITSUNAGA T, ISO D, et al. Generalized assorted pixel camera: Postcapture control of resolution, dynamic range, and spectrum [J]. IEEE Trans Image Process, 2010, 19(9):2241-53.
- [26] NAVASCUÉS M A, SEBASTIAN M V. Some results of convergence of cubic spline fractal interpolation functions [J]. Fractals, 2003, 11(1): 1-7.
- [27] 张思丽, 吴嘎日迪. 三阶 Hermite 插值算子在 Orlicz 空间内的加权逼近 [J]. 大学数学, 2016, 32(1): 11-14.
- ZHANG S L, WU G R D. Weighted approximation of third-order Hermite interpolation operator in Orlicz space [J]. University Mathematics, 2016, 32(1): 11-14.

作者简介



郁嘉恺, 2019 年于杭州电子科技大学获得学士学位, 现为杭州电子科技大学硕士研究生, 主要研究方向为计算成像、计算光谱成像。

E-mail: yjk18100171316@163.com

Yu Jiakai received his B. Sc. degree from Hangzhou Dianzi University in 2019. Now, he is a master student in Hangzhou Dianzi University. His main research interest includes computational imaging and computational spectral imaging.



赵巨峰 (通信作者), 2008 年于浙江大学获得学士学位, 2013 于浙江大学获得博士学位, 现为杭州电子科技大学副教授, 主要研究方向为计算成像、图像处理等。

E-mail: dabaozjf@hdu.edu.cn

Zhao Jufeng (Corresponding author) received his B. Sc. degree in 2008 and Ph. D. degree in 2013 both from Zhejiang University. Now, he is an associate professor in Hangzhou Dianzi University. His research interest includes computational imaging and image processing.