

## 多光谱彩色成像中高斯型滤色器的通道数确定

李遂贤<sup>1\*</sup>, 李强<sup>2</sup>, 贺金平<sup>2</sup>, 谢蕃芬<sup>3</sup>, 章夫正<sup>1</sup>, 梁静<sup>3</sup><sup>1</sup>滨州学院飞行学院, 山东 滨州 256600;<sup>2</sup>北京空间机电研究所, 北京 100094;<sup>3</sup>大连工业大学信息科学与工程学院, 辽宁 大连 116034

**摘要** 系统地探究了典型多光谱彩色成像系统的最优光谱通道数的确定问题。在前期多目标滤色片优化选取方法的基础上,将仅限于相同通道滤色器优化的概念拓展至不同通道数最优滤色器的优化,从而达到最优通道数确定的目的。基于Munsell光谱反射率数据集构建光谱反射率成像目标,通过真实CCD成像传感器的光谱灵敏度、D65光源的光谱功率分布以及高斯滤色器模型和最大线性独立滤色器选择算法,在10个噪声水平下实现了3~31个光谱通道,即29个虚拟多光谱相机对成像目标的光谱反射率重建的仿真计算。结果表明,通道数小于8时,5通道滤色器表现最优;和A光源相比,D65光源下的5通道最优滤色器的最大带宽达到80 nm,性能有显著的提升。

**关键词** 色度学; 成像系统; 计算方法; 光谱通道数; 多光谱彩色成像

**中图分类号** O436 **文献标志码** A

**DOI:** 10.3788/AOS231385

## 1 引言

多光谱彩色成像旨在通过少数光谱通道获取成像场景内物体表面在可见光范围内的光谱反射率以确保物体颜色的高保真再现。前期研究发现,由宽带滤色片组合构成的最优滤色器的透过率曲线具有高斯形状的曲线特征<sup>[1]</sup>;窄带系统方面,除了采用技术较早成熟的干涉滤色片<sup>[2-3]</sup>外,轻便的多光谱彩色相机的光谱通道大多由前置液晶可调谐滤波器(LCTF)滤色器<sup>[4-7]</sup>、片上工艺兼容的多光谱滤波器阵列(MSFA)滤色器等组件实现<sup>[8-9]</sup>,其光谱透过率也可用高斯曲线建模。除了光谱重建和颜色再现性能受限于光谱通道数外,光谱通道数还对系统的复杂度、数据负荷、成像的时间分辨率、图像的空间分辨率等系统总体指标产生重要影响。因此,无论宽带还是窄带系统,光谱通道数是多光谱彩色相机设计所需考虑的首要问题。

在搭建多光谱彩色相机时,以往研究中采用的光谱通道数不尽相同。Burns等<sup>[2]</sup>和Cosentino<sup>[3]</sup>采用干涉滤色片前置滤色器的通道数为7和12;Hardeberg等<sup>[5]</sup>、Wang等<sup>[6]</sup>和López-Álvarez等<sup>[7]</sup>采用LCTF构建的多光谱彩色成像系统,其中确定采用的光谱通道数分别为4~17、20和5不等;随着片上多光谱图像传感器技术的发展,多光谱图像的获取通过MSFA中空间周期排布、包含不同光谱通道的“滤色马赛克基本单位

(unit)”阵列来一次性实现,常见的光谱通道数有3、4、6、9、16等<sup>[8-10]</sup>。同样值得说明的是,MSFA中的“滤色马赛克基本单位”中所含的光谱通道数多小于其中的“滤色单元(element)”数,这是由于同一光谱透过率的滤色单元可能在滤色马赛克单位中重复出现<sup>[11-13]</sup>。前期,本文作者曾研究了多光谱彩色相机的滤色片的优化选取问题<sup>[1,14-15]</sup>,根据经验采用了4~8个光谱通道,但同样并未对光谱通道数的优化选取作深入研究。近年来,随着超平面图像传感器和亚波长光学器件的研究取得进展<sup>[16-26]</sup>,可见光范围内光谱重建精度和颜色保真再现问题仍是制约实用化的关键因素,最优光谱通道数确定同样是不可回避的关键问题。

大量的研究表明,无论滤色器为何种物理形态,在可见光谱段,采用奇异值分解(SVD)或主成分分析(PCA)等算法将成像目标反射率降维可以获得较少的光谱通道;而相反,采用滤色器中心透过波长逐个扫描测量波长的方法,则需要更多的光谱通道。鉴于此,本文将采用多光谱相机的降维模型,通过典型数据集构建虚拟多光谱成像系统,对多光谱彩色相机的高斯型滤色器的通道数优化选取进行了深入研究。首先,基于颜色均匀分布的1269个Munsell色卡光谱数据集构建成像目标的光谱反射率图像,通过真实CCD成像传感器的光谱灵敏度和D65光源的光谱辐射分布,以及高斯曲线簇模拟的滤色器的光谱透过率,在10个噪

收稿日期: 2023-08-10; 修回日期: 2023-09-27; 录用日期: 2023-10-07; 网络首发日期: 2023-10-23

基金项目: 山东省自然科学基金(ZR2022MF350)

通信作者: leesx\_72@hotmail.com

声水平下实现了 3~31 个光谱通道数,即 29 个虚拟多光谱相机对成像目标的成像仿真计算;继而,采用 PCA 算法实现光谱重建,并对相应系统的性能进行了评估;最后,给出了兼顾光谱重建和颜色再现精度的多

目标优化条件下的多光谱彩色成像系统的高斯型滤波器通道数优化结果。鉴于构建系统的数据集的典型代表性,本文研究结果对多光谱彩色成像通道数的确定有重要的参考价值。

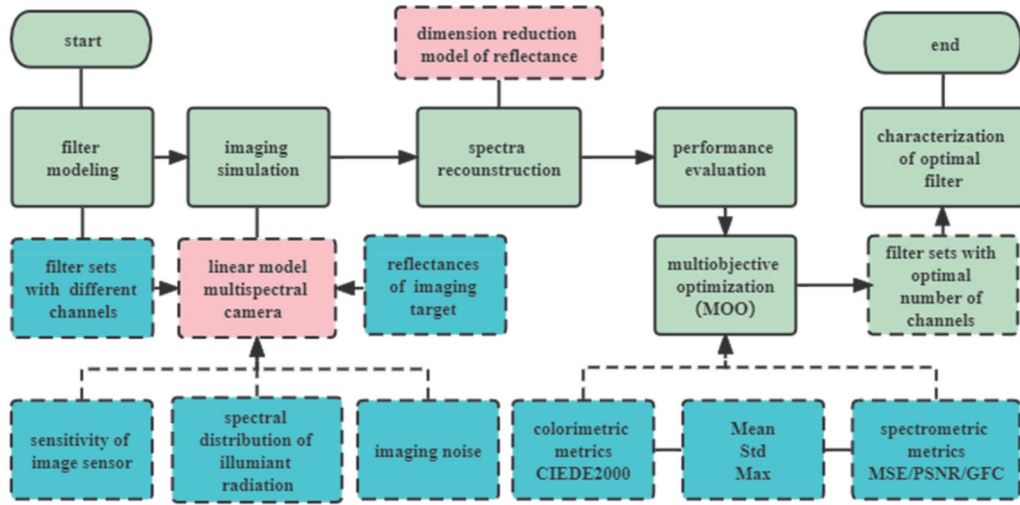


图 1 多光谱彩色成像系统光谱通道数优化工作流程

Fig. 1 Workflow of optimal number of spectral channels for multispectral color imaging system

## 2 原理和方法

本文涉及的多光谱彩色成像系统光谱通道数优化的工作流程如图 1 所示。第一步,给出多光谱彩色相机滤色器的高斯模型;第二步,以滤色器的通道数为变量,用多光谱相机的成像模型进行成像仿真;第三步,根据反射率降维模型和相机模型完成光谱重建;第四步,通过兼顾光谱重建和颜色再现性能的多目标函数,对系统的性能进行科学评价;第五步,在多目标评价数据的支撑下,找出最优光谱通道数,并对最优通道数滤色器及多光谱彩色成像系统的特征进行分析。

### 2.1 滤色器的高斯模型

典型的宽带滤色器经由优化选取之后为高斯型滤色器<sup>[1]</sup>,即其光谱通道的透过率有着高斯曲线的特征,无论是由不同介电材料堆叠镀膜制成的干涉滤色片的透过率<sup>[3]</sup>,还是 LCTF 都具有以中心透过波长为对称中心的钟形透过率曲线<sup>[4]</sup>,因此不考虑滤色器物理形态,即多光谱彩色相机具体组态时,将其光谱通道的透过率抽象为高斯函数具有相当的理论意义。随着超平面<sup>[16-17,26]</sup>、超透镜<sup>[27]</sup>等新一代片上集成图像传感器制造技术的发展,因其表现类似于经典滤色器所具有的窄带或宽带光谱响应特征,从而具备用于多光谱颜色信息获取的潜力,所以滤色器的高斯模型同样有望为新一代片上集成图像传感器多光谱彩色成像提供理论上的指导。

具体地,本文采用的滤色器的高斯模型为

$$f(\lambda_i) = e^{-\frac{(\lambda_i - \lambda_0)^2}{0.367 W^2}}, \quad (1)$$

式中: $\lambda_j$ 为滤色器透过率离散采样的第  $j$  个采样波长; $\lambda_0$ 为中心波长(或称峰值波长); $W$ 为滤色器的光谱带宽(FWHM,即半峰全宽);指数部分分母系数取值 0.367 的目的在于数值上满足高斯曲线的左右 FWHM 的波长维间距为光谱带宽  $W$ <sup>[14]</sup>。

后续成像仿真中, $\lambda_0$ 在 400~700 nm 之间每间隔 5 nm 取值,即中心波长取值数目  $m=61$ ,带宽  $W$ 在 10~80 nm 之间每间隔 5 nm 取值,即光谱带宽数目  $n=16$ ,从而形成不同的  $m \times n=915$  条高斯曲线组成的透过率曲线簇。鉴于本文的目的在于多光谱系统的通道数优化,仿真计算时,通道数变量在尽可能大的动态范围 3~31 内取值,其数目  $p=29$ 。将 915 条曲线中任意一条曲线作为滤色器第一通道的光谱透过率曲线,根据滤色片的“最大线性独立(MLI)”挑选法<sup>[1]</sup>,从其余曲线中选择后续通道滤色片透过率,从而参与仿真计算的滤色器总数为: $m \times n \times p=26535$ 。以 5 通道滤色器为例,上述方法构造的 5 通道滤色器的总数为 915 个。后续 5 通道最优滤色器从其中优化选取。

### 2.2 反射率的降维模型

Maloney<sup>[28]</sup>提出物体表面反射率的线性模型,将反射率表示为一系列基函数的加权和,可表示为

$$R = \alpha \Psi_0 + R_e, \quad (2)$$

式中: $\Psi_0$ 为  $k \times j$  ( $k \ll j$ ) 阶以反射率的前  $k$  个基向量为行的矩阵; $\alpha$ 为  $i \times k$  阶加权系数矩阵; $R_e$ 为残差,当  $k$  足够大时可以忽略不计,则有

$$R = \alpha \Psi_0. \quad (3)$$

实践中, $\Psi_0$ 可由成像场景反射率向量的大数据集通过 SVD 计算得出,代表成像场景反射率的先验特征信

息,上述基向量又被称为主成分<sup>[29-32]</sup>。

Munsell 色序系统是由美国颜色科学家 A. H. Munsell 在 20 世纪早期提出的、第一个准确地、定量地描述颜色感知的颜色系统,该颜色系统由大量不同颜色的色块组成,其主要特点两方面:其一,相邻色卡的色差的心理颜色感知相等,即色卡的颜色在均匀颜色空间等间隔分布;其二,包含了几乎所有人眼可见的颜色类别,即色卡的颜色在整个人眼可见颜色空间内均匀分布。因此,迄今为止,Munsell 色卡在颜色科学中几乎所有现代颜色测量和分级系统中都具有重要影响,具体应用包括:油漆、油墨和染色织物的颜色匹配;土壤颜色的环境和考古学描述;法医病理学家对头发的鉴定等<sup>[33]</sup>。Cohen<sup>[34]</sup>在 1964 年对 Munsell 色卡的 433 个光谱反射率曲线的研究发现,3 个基向量即可满足颜色匹配需求;Parkkinen<sup>[35]</sup>在 1988 年对 Munsell 色卡的 1257 个光谱反射率的研究发现,需要 8 个基向量才能满足所有光谱的高精度重建和颜色匹配,从而可望对自然场景的所有颜色实现高精度的线性表达。鉴于此,本文仿真实验中的光谱反射率成像目标由 1269 个 Munsell 色卡光谱数据集构建。

### 2.3 多光谱彩色成像仿真

颜色高保真再现是多光谱彩色成像不同于普遍意义的多光谱成像之处,然而其首要目标仍然是获取成像场景的在可见光范围内的光谱反射率,因此可将成像场景的反射率作为独立变量,进而作为多光谱成像系统的输入,考虑到图像传感器的线性响应,此时相机的多通道响应可以矩阵形式表示为

$$C = R_m M + N, \quad (4)$$

式中:输入反射率  $R_m$  为  $i \times j$  阶矩阵,其中  $i$  为反射率样本数, $j$  为反射率向量的维数;多光谱相机响应  $C$  为  $i \times k$  阶矩阵,其中  $k$  为光谱通道数; $N$  为同阶附加噪声矩阵;显然, $M$  的阶数为  $j \times k$ ,由多光谱相机的成像参数组成,不妨称其为成像矩阵,可写为

$$M = \text{diag}(L) \text{diag}(S) T, \quad (5)$$

式中: $L$ 、 $S$  分别为维数为  $j$  的光源的光谱功率分布以及相机图像光电传感器的光谱灵敏度列向量; $\text{diag}(\ast)$  表示将列向量排布为对角矩阵;显然, $T$  的阶数为  $j \times k$ ,为由滤色器的  $k$  个通道的光谱透过率列向量组成的滤色器透过率矩阵。将式(5)代入式(4),则多光谱彩色成像的线性模型为

$$C = R_m \text{diag}(L) \text{diag}(S) T + N. \quad (6)$$

与以往研究类似,噪声  $N$  取高斯类型,信噪比(SNR)的单位取 dB,取值范围为  $\{\infty, 50, 47, 43, 40, 37, 33, 30, 27, 23\}$ ,其中  $\infty$  表示系统无噪声<sup>[14]</sup>。SNR (用  $N_{\text{SNR}}$  表示)和噪声标准差  $\sigma$  的数量关系为

$$\sigma = 10^{-\frac{N_{\text{SNR}}}{10}}. \quad (7)$$

通过式(6)可完成成像仿真计算。除了前文已提到的滤色器外,本文仿真计算中将反射率输入数据  $R_m$

中的 1269 个光谱反射率的每个光谱反射率数据重复 20 次,以反映随机噪声对目标成像时更为真实的影响; $L$  和  $S$  分别为 Basler302f CCD 图像传感器的光谱灵敏度和 CIED65 标准光源的光谱功率分布,如图 2 所示。

### 2.4 多光谱反射率重建算法

本文采用了基于 PCA 的反射率重建算法。反射率重建是成像的逆运算,将式(3)中  $R$  的替换式(6)中的  $R_m$ ,以  $\alpha$  为未知变量求解,可得

$$\alpha = (C - N) A^T (A A^T)^{-1}, \quad (8)$$

式中: $A = \psi_0 \text{diag}(L) \text{diag}(S) T$ ;右上角标 T 表示矩阵的转置;再将式(8)代入式(6),可得反射率的重建表达式为

$$R_{\text{re}} = (C - N) A^T (A A^T)^{-1} \psi_0. \quad (9)$$

原则上,通过式(8)可以计算得出  $R_{\text{re}}$ ,实现反射率重建。另一方面,将式(8)等号两侧求矩阵转置,可得

$$\alpha^T = \left[ A (A A^T)^{-1} \right]^T (C - N)^T, \quad (10)$$

设

$$\begin{cases} Y = \alpha^T \\ \Gamma = \left[ A (A A^T)^{-1} \right]^T \\ X = (C - N)^T \end{cases}, \quad (11)$$

则式(10)化为

$$Y = \Gamma X. \quad (12)$$

不难看出式(12)为典型的线性方程组,根据线性方程组理论,当  $\Gamma$  条件数足够小时, $X$  的微小变化不影响  $Y$  的取值稳定性,此时噪声  $N$  可忽略。因此,在足够多的滤色器透过率  $T$  的可选前提下,存在  $A = A_{\text{opt}}$ ,使得

$$R_{\text{re}} = C A_{\text{opt}}^T (A_{\text{opt}} A_{\text{opt}}^T)^{-1} \psi_0 \quad (13)$$

成立,其中  $A_{\text{opt}}$  由特定优化参数确定,本文中为具有特定透过率及通道数的滤色器所确定。

### 2.5 通道数的多目标优化

最优通道数确定分两个阶段。首先,对各通道所有滤色器性能进行多目标综合评价,得到各通道的最优滤色器;然后,将各通道最优滤色器的性能指标再次进行多目标综合评价。

#### 2.5.1 各通道最优滤色器

本文的优化目标函数同样兼顾光谱重建误差和色差两个方面,采用排序赋分方法来确定最优解<sup>[1,15]</sup>,参与评价的指标有峰值信噪比(PSNR)、均方误差(MSE)、CIEDE2000 色差。针对 MSE 和 CIEDE2000,本文考虑其均值、标准偏差和误差上限(最大误差),小者赋高分;针对 PSNR,考虑均值和标准偏差两项指标,均值大者赋高分,标准偏差小者赋高分。值得指出的是,由于以往常采用的指标光谱吻合度指数(GFC)<sup>[1]</sup>在本文算例中表现的区分度很差,因此本文不再采用 GFC 评价指标。具体算法如下:

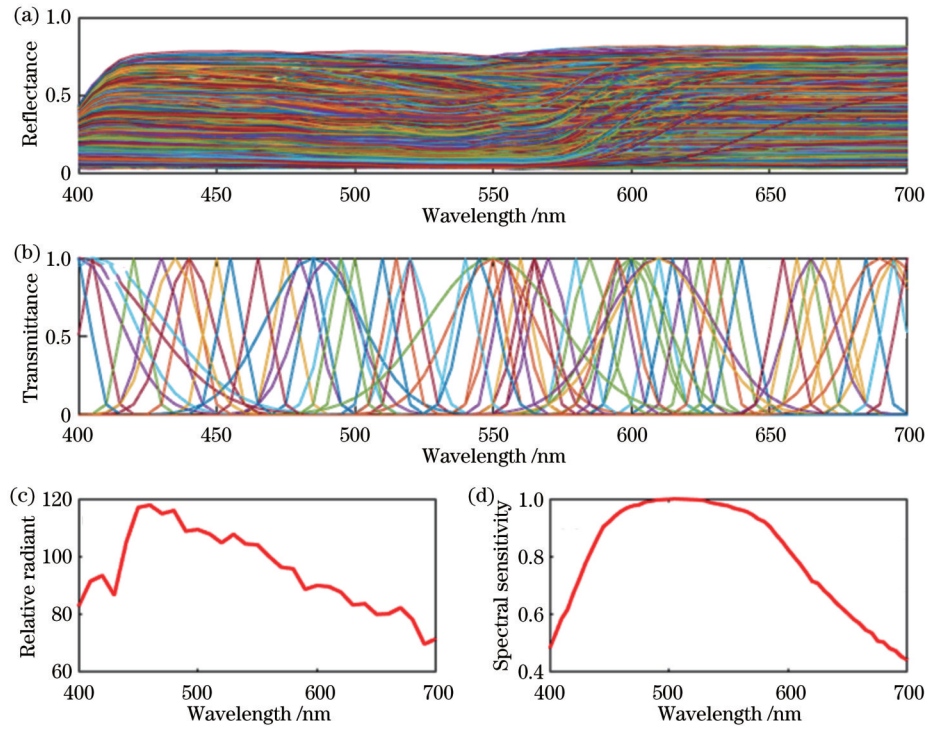


图 2 多光谱成像仿真的输入实验数据。(a)Munsell 色卡反射率谱;(b)部分高斯型滤色器的透过率;(c)D65 光源的光谱功率分布;(d)Basler302f CCD 图像传感器的光谱灵敏度

Fig. 2 Input experimental data of multispectral imaging simulation. (a) Reflectance spectra of Munsell color atlas; (b) partial transmittance of Gaussian filters; (c) spectral power distribution of D65 light source; (d) spectral sensitivity of Basler302f CCD imaging sensors

$$\text{输入: } R_{\text{pairs}} = \{ (r, r_{\text{re}})_{i \times k \times p \times n} \}, \quad (14)$$

即  $n$  个噪声水平下,通道数为  $k$ 、滤色器数目为  $p$  的原始图像光谱反射率  $R$  和重建光谱反射率图像  $R_{\text{re}}$  的  $i$  个反射率样本对的集合。

**输出:**  $T_{\text{opt}}^k$ , 即各通道下的最优滤色器[见式(20)]。

步骤:

1) 构建评价指标矩阵:

$$EV = \{ (EV)_{k \times p \times n \times m} \}, \quad (15)$$

式中,  $m$  为评价指标数, 依照前文所述  $m$  取值为 8。即通过计算原始图像光谱反射率  $R$  和重建光谱反射率图像  $R_{\text{re}}$  的所有对应光谱反射率样本对  $(r, r_{\text{re}})$  的误差评价指标来实现, 具体为, 首先计算原始反射率和重建反射率图像的  $i$  个反射率样本对在  $k$  个通道、 $p$  个滤色器下  $n$  个噪声水平下的 CIEDE2000、MSE 的均值、标准偏差和最大值, 以及 PSNR 的均值和标准偏差; 进一步, 将每个噪声水平下的上述评价指标中的均值和标准偏差求均值, 最大值中的最大者作为最大值, 则消除噪声维后的评价指标矩阵为

$$EV' = \{ (EV')_{k \times p \times m} \}. \quad (16)$$

2) 构建排序矩阵:

$$P = \{ (P_{EV'})_{k \times p \times m} \}, \quad (17)$$

即将每个样本对的  $n$  个噪声水平下的评价指标中的均值和标准偏差求均值, 最大值中的最大者作为消除噪

声维影响后的最大值, 评价指标依照前述优先劣后来排序。

3) 构建赋分矩阵:

$$F = \{ (F_{EV})_{k \times p_0 \times m} \}, \quad (18)$$

即将排序矩阵对应的元素赋分, 优者赋高分。由于各评价指标的相关性, 原则上色差指标占优者, 同时反射率重建误差指标也占优, 所以依照各指标排序均较靠前的滤色器才可能为被选为最优滤色器。本文中每个通道的滤色器个数  $p=915$ , 因此  $p_0$  取较小的数值为 90, 即仅考虑对每个评价指标靠前的滤色器赋分, 赋分值从 90 分到 1 分不等。

4) 求得滤色器各评价指标的得分总和:

$$F_{\text{total}} = \{ (F_{EV})_{k \times p_0} \}, \quad (19)$$

即计算相应通道下同一滤色器各指标得分之和。

5) 找到各通道得分最高的滤色器:

$$T_{\text{opt}}^k = \{ (T_{\text{opt}})_{k \times 1} \}, \quad (20)$$

式中,

$$(T_{\text{opt}})_{k \times 1} = \underset{i}{\operatorname{argmax}} [(F_{EV})_{k \times i}], 1 \leq i \leq p_0. \quad (21)$$

所以,  $T_{\text{opt}}^k$  亦即各通道下的最优滤色器的序号列表。

### 2.5.2 最优通道数

由于以 PCA 算法为成像和光谱重建机理, 宽带多光谱成像的优势在于以较少的光谱通道获取目标的光谱反射率。同时由于多光谱彩色成像的高保真颜色再

现的目标,评价指标中的色差相关指标,如最大色差对颜色再现的误差控制有着直接的意义。然而,与MSE一样,PSNR并不直接对应于人眼的主观感知。因此,在前述各通道最优性能滤色器确定后,滤色器性能指标满足颜色容限条件下,多目标评价得分较高且较少通道数者即为本文所要求的最优通道数:

$$M_{opt} = \underset{M}{\operatorname{argmax}} \left\{ (F_{EV})_{M \times 1} \right\} \cap \underset{M}{\operatorname{argmin}} \left\{ (\Delta E_{max}^M < \Delta E_0) \right\}, M \ll k_{max}, \quad (22)$$

式中:  $\{(F_{EV})_{M \times 1}\}$  为所有不大于  $M$  的较小的通道数对应的最优滤色器性能评价得分矩阵;  $\Delta E_{max}^M$  为通道数为  $M$  的最优滤色器的性能指标中的最大色差指标;  $k_{max}$  为滤色器通道数的最大值。式(22)为依据其自身最优滤色器性能指标排序、赋分、求和后的得分矩阵,其导出过程与式(15)~(21)类似,不再赘述。

### 3 结果与讨论

#### 3.1 最优通道数滤色器的确定

将前述的3~31共29个通道的滤色器、图像传感器光谱灵敏度、D65光源和10个噪声水平作为成像输入,经成像仿真计算和反射重建计算后,分别计算各自相应的性能评价指标,再经多参性能指标排序优化后,

得到不同通道数的最优滤色器序号和累积积分(ACC90),如表1所示;为了清晰起见,图3给出了表1中各通道数下最优滤色器的多目标聚合度指数(CMF)<sup>[14]</sup>的计算结果,根据CMF的定义,其数值越接近1,即反映了该滤色器的各评价指标得分越高。可以看出,数量上通道数和CMF并没有明显的相关性,尽管最高CMF的两个通道数分别为31和22,但4通道的CMF却高于其余13个通道数的相应数值,而通道数为9的CMF则不低于29个通道数中的27个。

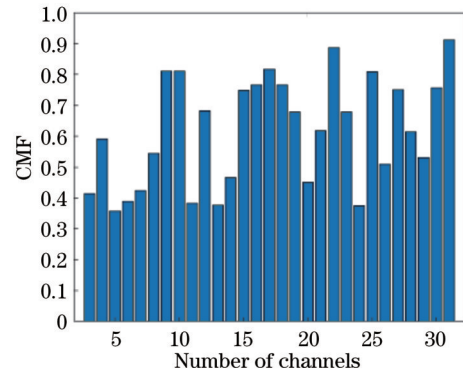


图3 不同通道数下最优滤色器的CMF  
Fig. 3 Concentration index of multiobjective functions (CMFs) of optimal filters under different channel numbers

表1 不同通道数的最优滤色器序号及其累积得分

Table 1 Serial numbers of optimal filters and their accumulative scores under different channel numbers

Number of channels	Sequential number of best filter sets	ACC90	Number of channels	Sequential number of best filter sets	ACC90	Number of channels	Sequential number of best filter sets	ACC90
31	731	656	21	888	445	11	678	275
30	592	544	20	424	324	10	591	583
29	817	382	19	844	488	9	531	583
28	741	442	18	652	551	8	888	392
27	653	540	17	591	587	7	867	304
26	307	366	16	652	551	6	577	279
25	577	582	15	834	539	5	899	257
24	307	270	14	834	336	4	712	425
23	888	488	13	834	271	3	863	298
22	712	638	12	678	491	—	—	—

虽然同一通道数目时,CMF可以很好地表征满足多目标的优化程度,然而不同通道数时的CMF对滤色器的具体性能指标则没有明显的可比性。为此,图4给出了表1中所列的不同通道数下最优的滤色器的CIEDE2000色差和MSE的性能评价结果,其中上方的线条表示最大误差,下方的线条表示均值误差,误差线的范围为一个标准差。

对照图3和图4(a),通过分析不难得出,CMF并不严格反映针对不同通道数目的滤色器性能的具体评价指标的优劣,显然这是由于CMF计算过程是在同一

通道数的滤色器范围内进行的。所以,同一通道数内计算得到的CMF仅能反映同一通道数的滤色器性能的多目标优化结果。

从图4(a)可以看出,随着通道数的增多颜色再现指标越好,大于8通道时最大色差甚至小于1个CIEDE2000色差单位;而对照图4(b)可以看出,MSE随着通道数增大表现出不同的规律,然而,值得庆幸的是,较小的通道数如通道数为8~18时,其MSE的数值几乎全部小于0.01而处于较低的误差水平。因此,这里可以得到一个可靠的结论:对宽带多光谱彩色成

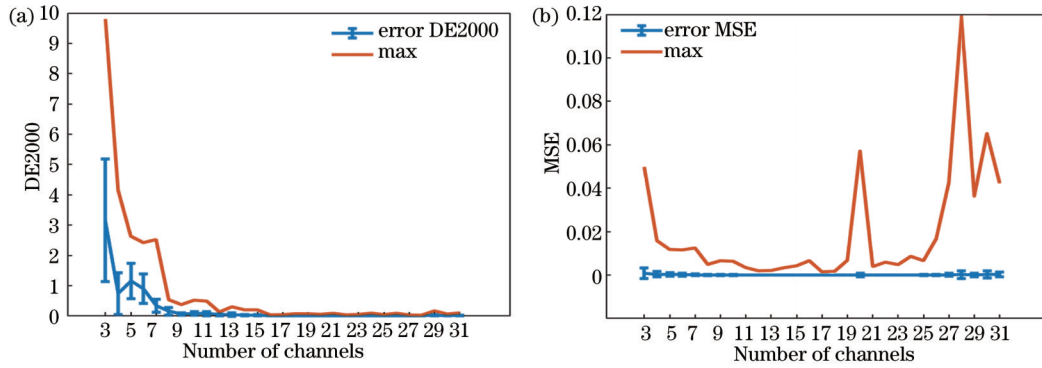


图 4 不同通道数下最优滤色器的性能指标。(a)CIEDE2000 色差;(b)MSE

Fig. 4 Optimal filter sets performance under different channel numbers. (a) CIEDE2000 chromaticism; (b) MSE

像而言,通道数的增加并不总是能带来重建光谱误差的减小,尤其对 MSE 指标而言。同时,综合图 4(a)和 4(b)还可以得出,较小的光谱通道数可同时满足足够小的 DE2000 色差和 MSE 光谱重建误差的实际需求。

可见,为了得到最优通道数,还须对不同通道的最优滤色器的性能指标进行比较,最终得到颜色再现和光谱重建性能好,同时通道数又较小的滤色器最优通道数结果。除了图 4(a)和 4(b)的 6 项指标外,再加上 PSNR 的均值和标准差指标,将这 29 个最优滤色器对应的 8 项性能指标进行排序和赋分后,得到的结果如图 5 所示。

从图 5 可以看出,当  $k_{max}$  为 16,即滤色器通道数不大于 16 时,9 通道滤色器性能最佳;当  $k_{max}$  为 8 时,5 通道滤色器性能最佳。对照图 4(a)可以看出,通道数为 5 的最优滤色器的最大 DE2000 色差不大于 3,而通道数为 9 的则小于 0.5,两者均处于较小的相邻通道数的最优滤色器中性能指标的最高水平,具体数据请参见表 2。值得强调的是,通过以上的研究过程可以看出,事实上可以对文献[14]中的 CMF 进行扩展,使之适用于不同通道滤色器之间的比较,从而既可以作为比较同一类别性能的多目标优化参数,同时又可以作为不同类别之间性能比较的多目标优化参数。在这种特定的意义下,本文首先通过计算不同通道数内的滤色器的 CMF 得到了相应的最优滤色器,然后通过计算不同通道数最优滤色器之间的 CMF 得到最优通道数,解决了最优通道数的唯一性求解问题。

综合以上分析,可以得到的结论有:

1) 对宽带多光谱彩色成像而言,通道数的增加并不总能带来重建光谱精度的提高,足够小的光谱通道数有望同时满足色差再现和光谱重建误差精度的要求。

2) 在不同通道数的最优滤色器范围内运用多目标优化方法,将 CMF 概念扩展,可获得唯一最优通道数。

### 3.2 最优通道数滤色器表征

由前文所述可知,多光谱彩色成像系统优化需要考虑较小的光谱通道数。为此,表 2 给出了 3~9 通道

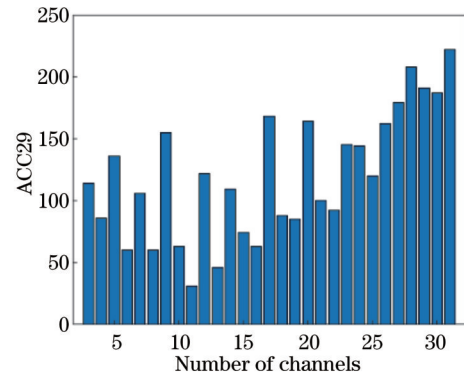


图 5 不同通道数的 29 个最优滤色器的累计积分

Fig. 5 Accumulative scores of 29 optimal filter sets with different channel numbers

最优滤色器的性能指标参数。从表 2 可以看出,除了 Max DE2000 (即 DE2000 的最大值)、Max MSE (即 MSE 的最大值)、PSNR 和 Std PSNR (即 PSNR 的标准偏差)之外,其他 4 个指标即均随着通道数的增加而变好;还可看出,PSNR 对光谱重建的 (包括 Max DE2000 和 Max MSE 指标在内)的敏感性更高。关于多目标评价指标的优化选取和设定,已经超出本文的研究范围。尽管本文涉及的多目标优化方法所采用的评价指标体系,即评价指标的选择和设定,直接影响优化结果,但它仍然是寻求唯一最优解的一种方法。

为了进一步明确各通道多光谱彩色成像系统在不同噪声下水平下的特性表现,图 6 给出了表 2 中 3~9 通道最优滤色器在不同噪声水平下的 8 个性能参数的计算结果。从图 6 至少可以得到以下结论(续前):

3) 总体而言,SNR 越小则各项性能指标越差,但具体性能指标随噪声变化的非线性特征不同。

4) CIEDE2000 相关的指标、MSE 以及 PSNR 三者相比,在噪声较小时,后两者对通道数的变化更敏感,曲线上的数据表现得更为离散。

此外,前文研究中确认的小于 8 通道的最优通道数 5 为最优滤色器的结论,从图 6 的数据中也可得到印证。虽然其单项性能指标未必最好,但多目标优化的

表 2 小通道数的多光谱彩色成像系统的最优滤色器性能指标

Table 2 Performance indices of optimal filter sets with small number of channels for multispectral color imaging systems

Channel	Filter set	ACC29	DE2000	Std DE2000	Max DE2000
9	531	155	0.07	0.05	0.38
8	888	60	0.16	0.13	0.54
7	867	106	0.34	0.22	2.52
6	577	60	0.90	0.49	2.42
5	899	136	1.16	0.58	2.63
4	712	86	0.74	0.69	4.15
3	863	114	3.16	2.02	9.80
Channel	MSE	Std MSE	Max MSE	PSNR	Std PSNR
9	$4.73 \times 10^{-5}$	$2.26 \times 10^{-4}$	$6.59 \times 10^{-3}$	54.8	11.9
8	$8.25 \times 10^{-5}$	$2.37 \times 10^{-4}$	$4.93 \times 10^{-3}$	51.0	11.9
7	$1.21 \times 10^{-4}$	$3.59 \times 10^{-4}$	$1.25 \times 10^{-2}$	48.8	11.8
6	$2.14 \times 10^{-4}$	$7.13 \times 10^{-4}$	$1.16 \times 10^{-2}$	48.3	12.5
5	$3.46 \times 10^{-4}$	$7.53 \times 10^{-4}$	$1.18 \times 10^{-2}$	43.0	11.4
4	$4.03 \times 10^{-4}$	$1.16 \times 10^{-3}$	$1.58 \times 10^{-2}$	45.3	12.7
3	$8.82 \times 10^{-4}$	$2.39 \times 10^{-3}$	$4.97 \times 10^{-2}$	40.5	12.1

思想方法,更全面地涉及到了多个评价指标的累积贡献。

图 7 给出了前述 5 通道和 9 通道的高斯型最优滤色器的透过率曲线。从图 7 可以看出,每个滤色器的各通道的中心波长并非严格均匀分布,同时各自带宽也不尽相同。值得注意的是,这里讲的带宽指的是 FWHM,可以从图 7 中清晰判读。此外,从图 7 还可以看出,5 通道滤色器中的 filter 1 和 filter 2 两个滤色器的带宽达 80 nm,与之前报道的结果有很大不同<sup>[14]</sup>,有差异的原因在于输入条件中采用的 CIE 标准光源数据不同,本文采用 D65,而之前采用的是 A 光源。表 3 列出了这两个光源下 5 通道最优高斯滤色器的特征,从表 3 可以看出,D65 光源下最优滤色器的带宽的取值要大很多,5 个通道中的两个为 80 nm,更新了宽带滤色器通常不为高斯型滤色器的概念<sup>[1,14,36]</sup>。

同样针对这两个 5 通道最优高斯型滤色器,表 4 列出了两者的性能指标。从表 4 可以看出,D65 光源下 5 通道滤色器的各项性能指标显著高于 A 光源下相应的性能指标,结合表 3 不难看出可以看出,D65 光源下更大带宽的高斯滤色器可有更好的光谱重建和颜色再现性能。可见,不同的输入条件虽然均可以采用本文方法取得唯一的最优解,但系统的性能却可能有很大差异。

综上所述,还可以得出以下结论(续前):

5) 依据本文多目标优化的原则,对小于 8 通道的高斯滤色器而言,在 D65 光源下,最优光谱通道数为 5; 和 A 光源相比,D65 光源下对高斯型 5 通道滤色器的性能有较大提高。

6) 不同光谱分布光源下的同通道数的最优滤色器不同。首先在光谱透过率曲线几何形状特征方面,主

要表现在带宽的不同;其次在性能方面,其颜色再现和光谱重建性能有较大差异。

## 4 总结和展望

基于当前的技术水平及其发展趋势,将不同物理形态的彩色成像系统的光谱通道建模为高斯型光谱通道,进而探讨采用较少数量的滤色通道以实现多光谱彩色成像系统的优化,具有重要的理论和实践意义。理论上,本文对宽带多光谱成像和通道数优化进行了系统的论述,并尽可能地采用数学形式逻辑的表达形式,在目前已报道的文献中并不多见;针对前期提出的 CMF 仅能满足同一通道最优滤色器的选取的局限,本文提出在各通道最优滤色器范围内迭代多目标优化算法的方法,同时结合误差容限的考量,原则上得到最优通道数的唯一解。实验中,首先通过高斯模型在 400~700 nm 的可见光范围内生成了每 5 nm 一个中心波长、带宽为每 5 nm 间隔在 10~80 nm 范围内一个取值的共 915 个光谱通道,然后将其作为输入条件完成了 10 个噪声水平下 3~31 个通道的 29 个多光谱彩色成像系统的仿真成像和反射率重建计算,通过拓展 CMF 的概念在通道间最优滤色器子集内复用 CMF 的计算,得出了采用通道数为 5 的高斯型滤色器可以满足系统全局最优的结论,解决了通道数确定的唯一性和系统全局最优的问题。

对多光谱彩色成像系统而言,在一定的色差容限条件下采用最小的光谱通道数为系统优化的工程目标。本文最优通道数的确定遵循了这一原则。通过与之前报道的结果对比发现,本文采用 D65 光源得出的最优通道数为 5 的多光谱彩色成像系统的性能远高于之前报道的 A 光源下的结果,可见,不同的成像参数即

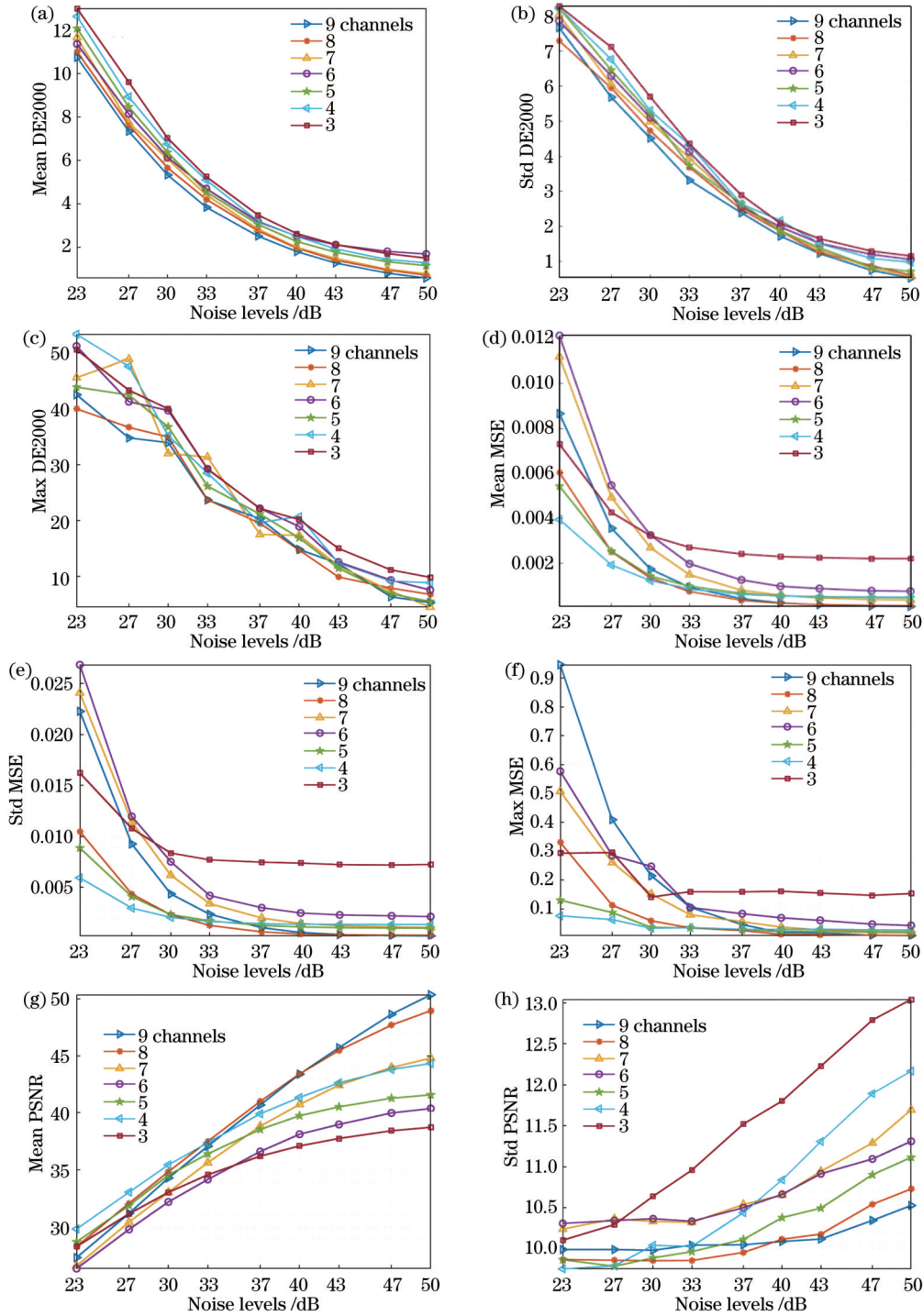


图 6 不同噪声水平下 3~9 通道最优高斯型滤色器的多光谱彩色成像系统的性能。(a)DE2000 均值;(b)DE2000 标准差;(c) DE2000 最大值;(d)MSE 均值;(e)MSE 标准差;(f)MSE 最大值;(g)PSNR 均值;(h)PSNR 标准差

Fig. 6 Performance of multispectral color imaging system with 3-9 channels optimized by Gaussian filter sets at different noise levels.

(a) Mean DE2000; (b) Std DE2000; (c) Max DE2000; (d) Mean MSE; (e) Std MSE; (f) Max MSE; (g) Mean PSNR; (h) Std PSNR

不同仿真成像的输入条件, 尽管均可求得各自相应的最优唯一解, 但会导致最终结果和系统性能可能有很大不同; D65 光源更有利于宽带多光谱成像系统性能的提升; 另一方面, 本文最优光谱通道数下的滤色器光谱带宽达到可选范围的最大值 80 nm, 远大于之前报道的 35 nm 的光谱通道带宽, 表明了高斯型滤色器和宽带多光谱成像在光谱通道带宽方面概念的一致性,

从而拓展了以往局限于滤色器通道具体物理形态的宽带多光谱成像的概念。

本文充分考虑了噪声, 针对 10 个噪声水平下的成像仿真和反射率重建计算, 由于评价指标的每个计算结果均来自于 25380 对目标光谱曲线和重建光谱曲线, 同时鉴于 Munsell 色卡的人眼可见颜色空间内分布的均匀性, 所以基于这些数据得出的结论具有普遍



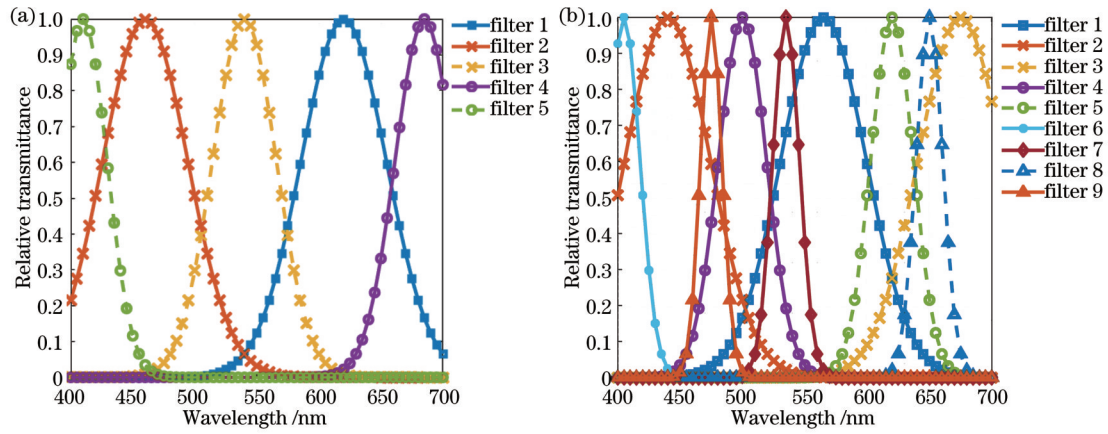


图 7 两个最优通道滤色器的光谱透过率曲线。(a)5通道;(b)9通道

Fig. 7 Transmittance curves of two filter sets with optimal number of channels. (a) 5 channels; (b) 9 channels

表 3 通道数为 5 的多光谱彩色成像系统在不同光源下最优高斯型滤色器的比较

Table 3 Comparison of optimal Gaussian filter sets for multispectral color imaging system with 5 channels under different light sources

Channel	D65		A <sup>[14]</sup>	
	$\lambda_0$ /nm	$W$ /nm	$\lambda_0$ /nm	$W$ /nm
1	410	40	425	35
2	460	80	485	35
3	540	60	550	35
4	620	80	610	35
5	685	60	675	35

表 4 通道数为 5 的多光谱彩色成像系统在不同光源下最优高斯型滤色器的性能比较

Table 4 Comparison of performance of optimal Gaussian filter sets for multispectral color imaging system with 5 channels under different light sources

Channel	D65			A <sup>[14]</sup>		
	DE2000	MSE / $10^{-4}$	PSNR	DE2000	MSE / $10^{-4}$	PSNR
4	0.69	4.03	45.3	3.97	9.37	39.95
5	1.16	3.46	43.0	3.85	9.15	39.82
6	0.90	2.14	48.3	3.43	8.05	41.64
7	0.34	1.21	48.8	3.26	7.66	41.47
8	0.16	0.83	51.0	2.77	8.39	42.21

意义。

本文的局限在于仅探讨了滤色器参数改变时多光谱成像系统的通道数优化,进一步针对其他成像参数协变时的多光谱成像系统的优化和实验研究,将为多光谱彩色成像系统性能的进一步提升开辟新的途径。

#### 参 考 文 献

[1] Li S X. Filter selection for optimizing the spectral sensitivity of broadband multispectral cameras based on maximum linear independence[J]. *Sensors*, 2018, 18(5): 1455.

[2] Burns P D, Berns R S. Analysis multispectral image capture [C]/Fourth Color Imaging Conference: Color Science, Systems and Applications, November 19-22, 1996, Scottsdale, Arizona, USA. [S.l.: s.n.], 1996: 50-55.

[3] Cosentino A. Multispectral imaging system using 12 interference filters for mapping pigments[J]. *Conservar Património*, 2015, 21: 25-38.

[4] Tominaga S. Spectral imaging by a multichannel camera[J]. *Journal of Electronic Imaging*, 1999, 8(4): 332-341.

[5] Hardeberg J Y, Schmitt F J M, Brettel H. Multispectral color image capture using a liquid crystal tunable filter[J]. *Optical Engineering*, 2002, 41(10): 2532-2548.

[6] Wang X, Zhang Y H, Ma X, et al. Compressive spectral imaging system based on liquid crystal tunable filter[J]. *Optics Express*, 2018, 26(19): 25226-25243.

[7] López- Álvarez M A, Hernández-Andrés J, Romero J. Developing an optimum computer-designed multispectral system comprising a monochrome CCD camera and a liquid-crystal tunable filter[J]. *Applied Optics*, 2008, 47(24): 4381-4390.

[8] Sawyer T W, Taylor-Williams M, Tao R, et al. Opti-MSFA: a toolbox for generalized design and optimization of multispectral filter arrays[J]. *Optics Express*, 2022, 30(5): 7591-7611.

[9] Shinoda K, Ohtera Y, Hasegawa M. Snapshot multispectral polarization imaging using a photonic crystal filter array[J]. *Optics Express*, 2018, 26(12): 15948-15961.

[10] Monno Y, Kikuchi S, Tanaka M, et al. A practical one-shot multispectral imaging system using a single image sensor[J]. *IEEE Transactions on Image Processing*, 2015, 24(10): 3048-3059.

[11] Miao L D, Qi H R. The design and evaluation of a generic method for generating mosaicked multispectral filter arrays[J]. *IEEE Transactions on Image Processing*, 2006, 15(9): 2780-2791.

[12] Henz B, Gastal E S L, Oliveira M M. Deep joint design of color filter arrays and demosaicing[J]. *Computer Graphics Forum*, 2018, 37(2): 389-399.

[13] Wu R J, Li Y Q, Xie X J, et al. Optimized multi-spectral filter arrays for spectral reconstruction[J]. *Sensors*, 2019, 19(13): 2905.

[14] Li S X. Superiority of optimal broadband filter sets under lower noise levels in multispectral color imaging[J]. *Color Research & Application*, 2021, 46(4): 783-790.

[15] 李遂贤. 基于多目标优化的多光谱相机的宽带滤色片选取[J]. *光学学报*, 2020, 40(4): 0411001.

Li S X. Broadband filter selection for multispectral camera based on multi-objective optimization[J]. *Acta Optica Sinica*, 2020, 40(4): 0411001.

- [16] Yu N F, Capasso F. Flat optics with designer metasurfaces[J]. *Nature Materials*, 2014, 13(2): 139-150.
- [17] Zou X J, Zhang Y M, Lin R Y, et al. Pixel-level Bayer-type colour router based on metasurfaces[J]. *Nature Communications*, 2022, 13: 3288.
- [18] Tay S W, Watanabe M, Endo F, et al. Polarization-independent transmission color sheet using 2D plasmonic metasurface embedded in elastomer nanosheet[J]. *Applied Physics Express*, 2023, 16(3): 032004.
- [19] Ji C G, Lee K T, Xu T, et al. Engineering light at the nanoscale: structural color filters and broadband perfect absorbers[J]. *Advanced Optical Materials*, 2017, 5(20): 1700368.
- [20] Su J X, Mo X W, Si G Y, et al. High selectivity color filters based on bismuth enhanced plasmonic nanorods[J]. *Optics Communications*, 2021, 490: 126941.
- [21] Chen K L, Wen Y, Lin Y S. Plasmonic enhancement of metamaterial nanograting with high color purity and wide color gamut characteristics[J]. *Optics Communications*, 2022, 506: 127575.
- [22] Gildas F, Dan Y P. Review of nanostructure color filters[J]. *Journal of Nanophotonics*, 2019, 13(2): 020901.
- [23] Kim S, Park C, Kim S, et al. Design parameters of free-form color splitters for subwavelength pixelated image sensors[J]. *iScience*, 2023, 26(10): 107788.
- [24] Wu X L, Gao D H, Chen Q, et al. Multispectral imaging via nanostructured random broadband filtering[J]. *Optics Express*, 2020, 28(4): 4859-4875.
- [25] Yao J, Lin R, Chen M K, et al. Integrated-resonant metadevices: a review[J]. *Advanced Photonics*, 2023, 5(2): 024001.
- [26] Barnes W L, Dereux A, Ebbesen T W. Surface plasmon subwavelength optics[J]. *Nature*, 2003, 424(6950): 824-830.
- [27] Ke Y C, Nie B Y, Wei L D, et al. High-efficiency metalens-based compact multispectral variable spectrometer[J]. *Applied Optics*, 2023, 62(6): 1456-1461.
- [28] Maloney L T. Evaluation of linear models of surface spectral reflectance with small numbers of parameters[J]. *Journal of the Optical Society of America A*, 1986, 3(10): 1673-1683.
- [29] 李遂贤, 廖宁放, 孙雨南. 基于主成分分析的多光谱相机灵敏度优化[J]. *光电工程*, 2006, 33(3): 127-132, 136.
- Li S X, Liao N F, Sun Y N. Optimal sensitivity of multispectral camera based on PCA[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2006, 33(3): 127-132, 136.
- [30] 赵海, 李宏宁, 陈豪, 等. 基于改进的主成分分析法宽带光谱反射率重建[J]. *光学学报*, 2023, 43(9): 0930002.
- Zhao H, Li H N, Chen H, et al. Broadband spectral reflectance reconstruction based on improved principal component analysis [J]. *Acta Optica Sinica*, 2023, 43(9): 0930002.
- [31] Fairman H S, Brill M H. The principal components of reflectances[J]. *Color Research & Application*, 2004, 29(2): 104-110.
- [32] Tzeng D Y, Berns R S. A review of principal component analysis and its applications to color technology[J]. *Color Research & Application*, 2005, 30(2): 84-98.
- [33] Cochrane S. The Munsell Color System: a scientific compromise from the world of art[J]. *Studies in History and Philosophy of Science Part A*, 2014, 47: 26-41.
- [34] Cohen J B. Dependency of the spectral reflectance curves of the Munsell color chips[J]. *Psychonomic Science*, 1964, 1(1/2/3/4/5/6/7/8/9/10/11/12): 369-370.
- [35] Parkkinen J P S, Hallikainen J, Jaaskelainen T. Characteristic spectra of Munsell colors[J]. *Journal of the Optical Society of America A*, 1989, 6(2): 318-322.
- [36] Li S X, Zhang L Y. Optimal sensitivity design of multispectral camera via broadband absorption filters based on compressed sensing[M]//Urbach H P, Zhang G J. 3rd International Symposium of Space Optical Instruments and Applications. Springer proceedings in physics. Cham: Springer, 2017, 192: 329-339.

## Optimal Number of Spectral Channels for Gaussian Filter Sets in Multispectral Color Imaging

Li Suixian<sup>1\*</sup>, Li Qiang<sup>2</sup>, He Jinping<sup>2</sup>, Xie Xufen<sup>3</sup>, Zhang Fuzheng<sup>1</sup>, Liang Jing<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Flight College, Binzhou University, Binzhou 256600, Shandong, China;

<sup>2</sup>Beijing Institute of Space Mechanics and Electricity, Beijing 100094, China;

<sup>3</sup>School of Information Science and Engineering, Dalian Polytechnic University, Dalian 116034, Liaoning, China

### Abstract

**Objective** As the number of spectral channels significantly affects the system complexity, data load, time resolution, and spatial resolution of images, a multispectral color imaging system that aims to accurately reproduce the visible spectrum reflectance of object surfaces is preferred using a limited number of spectral channels. However, seldom literature has been explained statistically for the determination of numbers of spectral channels. The heuristic or even arbitrary number of spectral channel configurations challenges the purpose of multispectral color imaging for accurate spectral reconstruction and color reproduction. It is even more crucial with the emergence of various modalities of color imaging sensors, such as those of with liquid crystal tunable filters (LCTFs) and multispectral filter arrays (MSFAs) and recently developed nanostructure color filters. Previous evidence shows that the spectral transmittance of the optimal filter set for multispectral color cameras is Gaussian curves. We build upon the previously proposed multi-objective optimization method for filter selection with specific channels and systematically explore the way to determine the optimal number of spectral channels for typical multispectral color imaging systems with filters modeled by Gaussian functions.

**Methods** The workflow for optimizing the number of spectral channels in the multispectral color imaging system studied in this research is illustrated in Fig. 1. Firstly, we provide a systematic theoretical presentation of the spectral sensitivity optimization by filter selection for the broadband multispectral imaging and the method for the channel numbers optimization, which could scarcely be found in the literature published so far to the best of our knowledge. The highlight of the proposed method is built upon the previously proposed multi-objective optimization method for filter selection, and we systematically explore the way to determine the optimal number of spectral channels for typical multispectral color imaging systems. Then, we investigate the optimal number of channels experimentally. Using the Munsell spectral reflectance dataset to construct the spectral imaging targets, imaging simulations and reflectance reconstruction under 10 noise levels are conducted by the spectral sensitivity of an actual CCD image sensor, the spectral distribution of the D65 illuminate, and the transmittance curves of the filters generated by Gaussian filter model. It involves 29 virtual multispectral cameras, or in other words, the channel numbers are 3–31, respectively.

**Results** 1) Determination of the optimal number of channels. The optimal filters' serial numbers and the corresponding accumulative scores under different channel numbers are presented in Table 1. Figure 3 illustrates the concentration index of multi-objective functions (CMFs) under different channel numbers. Moreover, Fig. 4 depicts the performance of the best filter sets in terms of CIEDE2000 and MSE, respectively, under different channel numbers. Additionally, Fig. 5 displays the accumulative scores of the best filter sets' performance within the 29 numbers of channels.

2) Characterization of the filter set with the optimal channel number. The optimal number of channels for a multispectral color imaging system is 5 (Fig. 6) when the maximum number of channels is not greater than 8. Figure 7 presents the transmittance curves of the optimal Gaussian filter sets with five and nine channels, respectively. Table 3 presents the characteristics of the optimal Gaussian filter sets with five channels under two different illuminates. Table 4 compares the performance indices of the optimal Gaussian filter sets with five channels under different illuminates.

**Conclusions** From the results, the following six items could be concluded: 1) For broadband multispectral color imaging, increasing the number of channels does not always lead to an improvement in spectral reconstruction accuracy. It is observed that a smaller number of spectral channels has the potential to simultaneously satisfy the requirements of color difference reproduction and spectral reconstruction error accuracy; 2) By employing the multi-objective optimization method within the optimal filter range for each channel, that is to say, extending the concept of CMF, a unique optimal number of channels can be obtained; 3) In general, a higher noise level (i. e. , a lower signal-to-noise ratio) often indicates worse performance indicators, but the specific performance indicators may exhibit varying nonlinear characteristics with the noise; 4) CIEDE2000 is more sensitive to noise when compared to the relevant indicators, MSE and PSNR, as indicated in Fig. 7, and the latter two are more discrete; 5) Based on the principles of multi-objective optimization in this study, the optimal number of spectral channels for Gaussian filters with less than eight channels is 5 under the illuminant D65. Moreover, compared with illuminant A, D65 enhances the performance of the Gaussian filters with five channels in terms of spectral reconstruction and color reproduction; 6) Optimal filters with the same number of channels may differ under different spectral distribution light sources. Differences can be observed in terms of the geometric characteristics of transmittance curves, primarily the varying bandwidths. Furthermore, significant differences can be observed in performance, including color reproduction and spectral reconstruction.

Briefly, the spectral transmittance of the optimal color filter set can be described by a series of Gaussian curves, and the number of spectral channels significantly impacts its performance and complexity. We systematically explore the way to determine the optimal number of spectral channels for typical multispectral color imaging systems. It would be of great theoretical and practical significance to model the spectral channel of color imaging systems with different physical modalities as Gaussian spectral channels and then explore the necessary color filter channels to optimize multi-spectral color imaging systems.

**Key words** colorimetry; imaging system; computation methods; number of spectral channels; multispectral color imaging