

基于多目标优化的多光谱相机的宽带滤色片选取

李遂贤^{1,2*}

¹滨州学院飞行学院, 山东 滨州 256600;

²利兹大学设计学院, 利兹 LS2 9JT, 英国

摘要 基于多目标优化方法, 针对几个常用于评价多光谱相机性能的参数峰值信噪比(PNSR)、拟合优度系数(GFC)、CIE 色差评价系数(CIEDE2000)和均方误差(MSE), 及其对应的最大值或最小值, 按照最优排序集分的方法, 得到了各评价参数均可以得到较好取值的最优滤色器。和前期研究相比, 待选滤色片数量由 45 增加为 1035, 同时成像场景的反射率样本数量由 24 增加为 1269。结果表明, 待选滤色片数量和反射率向量空间增加后, 最优滤色器的性能更好; 同时描述最优滤色器的光谱透过率向量矩阵自身的三个参数即滤色器向量矩阵的条件数(Cond)、峰值均匀度指数(UF)和相邻滤色片交叠度指数(OLP)的数值也更加稳定。实验结果可为通过滤色器向量矩阵定量选取宽带多光谱滤色片提供参考。

关键词 成像系统; 多光谱和高光谱成像; 宽带滤色器; 光谱灵敏度优化; 光谱向量空间; 多目标优化

中图分类号 O436

文献标志码 A

doi: 10.3788/AOS202040.0411001

Broadband Filter Selection for Multispectral Camera Based on Multi-Objective Optimization

Li Suixian^{1,2*}

¹Flying College, Binzhou University, Binzhou, Shandong 256600, China;

²School of Design, University of Leeds, Leeds LS2 9JT, UK

Abstract Based on the multi-objective optimization method, an optimal filter with good values for each evaluation parameter is obtained. This is achieved according to the cumulative scoring method of optimal ordering for several parameters often used to evaluate the performance of multi-spectral cameras such as peak signal to noise ratio (PNSR), goodness of fit coefficient (GFC), CIE color difference index(CIEDE2000) and mean square error (MSE) and their corresponding maximum or minimum values. Compared with the previous study, the number of filters to be selected increases from 45 to 1035; however, the number of reflectivity samples of the imaging scene increases from 24 to 1269. The results show that the performance of the optimal filter is better when the number of filters and the reflectivity vector space increase. At the same time, the values of the three parameters of the spectral transmittance vector matrix of the optimal filter, namely the condition number (Cond), the peak uniformity index (UF), and the adjacent filter overlap index (OLP), are also more stable. The experimental results can provide a reference for the quantitative selection of wideband multispectral filters via the vector matrix of the filter.

Key words imaging systems; multispectral and hyperspectral imaging; broadband filters; spectral sensitivity optimization; spectrum vector space; multi-objective optimization

OCIS codes 110.4234; 350.2450

1 引 言

多光谱成像旨在通过少数光谱通道获取成像目标的特征光谱信息。用来实现多光谱成像的软硬件系统通常被称为多光谱相机。在各种多光谱相机的

组态中, 宽带滤色片相机较窄带组态有着独特的优势^[1]。这是因为: 首先宽带滤色片具有低成本优势, 所用的透射滤色片种类多、易购得; 其次, 透射光谱不受入射角度的影响, 入射角度的不同不会引起透射光的显著色散; 最后, 同时也是最明显的优势为宽

收稿日期: 2019-08-30; 修回日期: 2019-10-08; 录用日期: 2019-10-21

基金项目: 滨州学院引进人才科研启动项目(BZXYHZ20161008)、山东省重点研发项目(2016GGX101023)

* E-mail: suixian.li@bzu.edu.cn

谱段的光谱透过特性使得透过光谱必然蕴含更多的光谱信息。前期的研究中,我们提出基于滤色片透过率向量空间中选取最大线性无关空间组的方法来确定优选滤色片组合,该方法可以直观地通过滤色片透过率曲线形态特征在待选滤色片透过率向量集中实现滤色片的优化选取^[1-2]。但是,前期的研究存在局限:1)由于单一宽带滤色片数目仅为45,并且文献中限定了单一通道滤色片数目不超过3,这样不可避免地导致待选滤色片向量集的大小受限;2)最优化判据设定为8个评价参数[分别为峰值信噪比(PNSR, R_{PSN})、拟合优度系数(GFC, C_{GF})、CIE色差评价系数(CIEDE2000)和均方误差(MSE, x_{MSE}),及其对应的最大值或最小值],然后以这8个评价参数为判据对光谱重建效果以排序集分的方法求得最优滤色器,该方法属于多目标函数下的帕累托最优问题,显然采用多目标优化理论进行表述会更加明确;3)仿真实验中采用的反射率样本为Macbeth色卡,仅有24个反射率样本,其光谱样本的代表性有限。

多目标优化方法是工程优化算法的一个分支,用以解决实际系统设计时多个不同的待优化目标的不一致的问题^[3-4]。针对滤色片性能的评价,前期研究中采用多个评价参数最优排序集分的方法,将多个评价参数融合到一个受现实约束的目标函数中,获得最优滤色片组合,和多目标优化的核心思想一致^[5]。

本文在前期研究的基础上,对待选滤色片的数量进一步扩充;引入多目标优化的概念,以拓宽滤色片选取的研究思路;采用更有代表性的Munsell色卡的1269个光谱反射率样本集,使得实验结果更具普遍性。通过本研究,以期多光谱相机的宽带滤色器的优化设计提供参考。

2 多目标选取实验仿真

2.1 多目标优化

多目标优化问题的一般定义为

$$\begin{cases} \min_x (F(\mathbf{x})) = (f_1(\mathbf{x}), f_2(\mathbf{x}), \dots, f_k(\mathbf{x})) \\ \text{Subject to } \mathbf{x} \in \mathbf{s} \end{cases}, (1)$$

式中: k 是标量目标函数的数量; \mathbf{x} 为决策变量(或称设计变量),其定义域为 $\mathbf{s} \in \mathbf{R}^n$, n 为 \mathbf{x} 的维数; $F(\mathbf{x}) \in \mathbf{R}^k$ 为目标函数; $f_i(\mathbf{x}) \in \mathbf{R}^k$ 可称为目标(Objectives)、判据(Criteria)、成本函数(Cost functions)等,关于多目标优化的更加详尽的综述可

参考文献[3-4]。针对多光谱相机设计中滤色片的优化选取问题,(1)式中 \mathbf{x} 为以各光谱通道滤色片光谱透过率向量为矩阵的对应滤色片的光谱透过率向量; \mathbf{s} 为所有可能的待选滤色片透过率向量构成的向量集; $f_i(\mathbf{x})$ 为第 i 个目标函数,这些目标函数为评价多光谱相机性能的各类不同参数。

2.2 宽带多光谱成像仿真和评价

运用多光谱成像数值仿真实现滤色片的优化选取是常用的研究方法。通常包含三个步骤。第一步为成像仿真计算:根据成像模型和输入条件计算相机的响应^[6]。第二步为光谱重建计算,即成像过程的逆运算,根据相机模型和输入条件,利用算法对成像的光谱实现精确估计。光谱重建的英文为Spectral reconstruction,中文语境下也被称为光谱重构、光谱反演和光谱复原等^[7-10],其含义均为根据光谱成像产品得出光谱分布的计算过程。第三步为成像质量评价,通过一系列评价参数评估多光谱成像系统的光谱重建性能。设定变化可控的输入条件为宽带滤色器(即光谱通道由宽带滤色片构成),通过对不同滤色器下光谱重建性能评价参数的比较,可以得到最优滤色器,进而提取最优滤色器表征参数。

依据前期使用的多光谱相机模型,成像场景的反射率 $\mathbf{R}_{\text{original}}$ 与多光谱成像响应 $\mathbf{C}_{\text{Response}}$ 的关系为

$$\mathbf{C}_{\text{Response}} = \{[\text{diag}(\mathbf{L})\text{diag}(\mathbf{P})\mathbf{T}]^T \mathbf{R}_{\text{original}}\}^T + \mathbf{N}_{\text{Gaussian}}, (2)$$

式中: \mathbf{L} 、 \mathbf{P} 分别为光源的光谱分布以及相机光电传感器的光谱灵敏度; \mathbf{T} 为滤色器透过率向量组成的列矩阵;右上角标 $(\cdot)^T$ 表示矩阵的转置; $\mathbf{N}_{\text{Gaussian}}$ 为相机响应的噪声加性高斯噪声; $\text{diag}(\cdot)$ 表示以括号内某向量的元素为对角线的对角矩阵。和前期发表的处理方法相同,仿真计算时采用光谱通道数目为5个(4~8光谱通道)的多光谱相机模型进行仿真计算,加性高斯噪声水平 R_{SN} (信噪比,SNR)的取值范围为 ∞ , 50 dB, 47 dB, 43 dB, 40 dB, 37 dB, 33 dB, 30 dB, 27 dB, 23 dB,其中 $R_{\text{SN}} \sim \infty$ 表示系统无噪声^[2]。 R_{SN} 和噪声方差 σ 的数量关系为

$$\sigma = 10^{-\frac{R_{\text{SN}}}{10}}. (3)$$

噪声通过Matlab函数imnoise^[11]叠加至(1)式,从而最终得到响应图像 $\mathbf{C}_{\text{Response}}$ 。

光谱反射率重建算法有多种,选用(3)式所示的基于主成分分析的反射率重建算法来估计成像场景的反射率,即

$$\mathbf{R}_{\text{Reconstruction}} = \boldsymbol{\psi}_0 [(\mathbf{A}^T \mathbf{A})^{-1} \mathbf{A}^T] \mathbf{C}_{\text{Response}}, \quad (4)$$

式中： $\mathbf{A} = \{[\text{diag}(\mathbf{L}) \text{diag}(\mathbf{S}) \mathbf{P}]^T \mathbf{R}_{\text{original}}\}^T \boldsymbol{\psi}_0$ ；方括号内的部分 $(\mathbf{A}^T \mathbf{A})^{-1} \mathbf{A}^T$ 可通过 Matlab 伪逆计算公式 $\text{pinv}(\cdot)$ 计算得出； $\boldsymbol{\psi}_0$ 为以 Munsell 色卡反射率的前 m 个基向量为列的矩阵， m 为多光谱相机的通道数，也就是说， $\boldsymbol{\psi}_0$ 事实上代表了成像场景反射率的先验信息。该算法被称为主成分分析法，Maloney 和 Wandell 首次利用该算法来反演光谱反射率，其核心思想在于进行反射率重建计算时以训练样本的主成分向量作为先验信息，以确保光谱反射率反演的准确性^[12-13]。需要指出的是，该算法同时也是宽带成像光谱重建的理论基础^[2,14]。

多光谱成像性能评价指的是对光谱重建性能的评价。目前为止，宽带多光谱相机的光谱重建性能可从两个方面评价，分别为光谱重建误差和色差^[15-16]。评价多光谱成像系统光谱重建性能的指标有 R_{PSN} 、 C_{GF} 、 χ_{MSE} ，这些指标可以从不同角度直接评价光谱重建精度，但不包含人眼视觉感知的误差信息；目前 CIE 推荐颜色再现评价体系很多，包括 CIELAB、CIEDE2000 色差公式和 CIECAM02 色貌模型等，由于本文不涉及图像级的颜色视觉评价，故采用较新发布的 CIEDE2000 色差公式从色差的角度的评价多光谱成像系统的光谱重建性能。色差是在人眼视觉的均匀颜色空间中，不同光谱对应的颜色差别，在照明和颜色科学相关的工程应用领域应用广泛^[17]。和前期的研究相同，GFC 的表达式采用

$$C_{\text{GF, NMSE}} = 1 - \frac{\|\mathbf{R} - \hat{\mathbf{R}}\|}{\|\mathbf{R} - \text{mean}(\hat{\mathbf{R}})\|}, \quad (5)$$

式中：下角标 NMSE 表示成本函数采用归一化均方根误差； $\hat{\mathbf{R}}$ 为反射率向量 \mathbf{R} 的估计向量； $\|\cdot\|$ 表示向量的 2 阶矩； $\text{mean}(\cdot)$ 表示取平均。(5) 式可由 Matlab 函数 Goodness of Fit 实现。通常越是精确的光谱估计，对应的 R_{PSN} 取值也越大， C_{GF} 的取值越接近 1，CIEDE2000 和 MSE 越接近 0；而针对不同的滤色器而言，则标志着对应更优的滤色器。

2.3 基于多目标优化的滤色器的排序集分算法

研究者一直致力提出一个指数，用于实现颜色复制和光谱复原的统一评价。Imai, Rosen 和 Berns 认为单一评价指数不能对光谱重建和颜色复制同时实现恰当评价^[15]；从发表的论文看，多数情况下，作者需要通过分列几个参数评价多光谱成像系统的光谱重建性能^[15-16]。López-Álvarez 等^[13]提出 CSSM 指数，将几个参数综合，用来评价一种模拟退火算法

下的白昼光光谱的复原质量。以前的研究使用 2 个维度 8 个参数对滤色器性能进行评价，对单个评价参数排序计分，然后计算集分得出兼顾各评价参数占优的最优滤色片组，其实质是多参数优化问题的一种解决方案^[2]。鉴于本文的研究范围，重点说明多参排序集分方法。

多参排序集分的方法，目的是将多个评价参数融合到一个受现实约束的目标函数中。尽管各评价参数的评价结果大体一致，但仍然存在不一致，这是因为各参数的定义不同。假定一个滤色器在经单个评价参数确认的占优滤色器集合中出现的频次最高，也就认为该滤色器为最优滤色器。另一方面，不同评价参数下的最优滤色器在大多数情况下是高度聚合的，去除被单一参数评价结果确认的非占优的滤色器，这样就确保了仅有少数滤色器参与集分，从而使得多参评价集分计算简便易行。

在前期的实验中，单滤色片在首选滤色器全集中的数目为 45 个，针对每个评价参数取 9 个最优滤色器（占 20%），按照各参数评价结果排序，分别将对应的最优的滤色器赋 9、8、7、6、…、3、2、1 分，最后把所有集分不为零的滤色器在各评价参数下的得分值相加，得到滤色器的排序集分累加值，集分最高者为最优滤色器^[2]。本文首选滤色器除了 45 个单片滤色器外，还包含这 45 个单滤色片中任意两组组合叠放后的 990 个双片叠放滤色器（数值上，其对应透过率向量为两者透过率向量对应元素的乘积），这样总的待优化选取的滤色器的数目为 1035。每个评价参数针对 1035 个滤色器对应的光谱重建结果的优劣进行计算，最优者计分 1035，最差者计分 1；实验中仅取每个评价结果对应的前 15 个最优滤色器，然后再将每一入选滤色器在各对应评价参数下的计分累加，得分最高者即确认为最优滤色器。

需要说明的是，任意后续光谱通道最优滤色片的选取是在先前通道的滤色片组合确定后，以“条件数最小准则”选取得到的；而最终不同通道数的最优滤色器，则是从所有选定相同通道下的滤色器中运用“最优化判据”选取得到的，最优化判据就是上述的“多目标优化判据”，亦即“基于多目标优化的滤色器的排序集分算法”。以 5 通道的最优滤色器为例：1035 个滤色片透过率向量作为首选滤色片透过率向量，通道数增加 n ，针对每一个前期确定的滤色器，根据条件数最小的原则，可以从剩余的 $1035 - n$ 的滤色片透过率向量中挑选出下一个，这样第一步可以得到 1035 个 5 通道的滤色器；第二步，只需从

已确定的 1035 个 5 通道滤色器中,利用“排序集分算法”得到最优的选取结果。

从上述多参排序集分的处理过程可以看出,该方法克服了不同评价参数之间无法直接比较的问题,同时确保优选滤色器在各不同的评价参数下都有较好的结果。

2.4 宽带滤色器描述参数

仅从滤色器光谱透过率向量矩阵出发,本文沿用前期研究中采用的三个参数^[2]。第一为条件数 N_{Cond} (即 Condition number, Cond),即以滤色片透过率向量为列的矩阵条件数,条件数是衡量各滤色器透过率向量之间线性无关程度的参数。事实上,在滤色器的第一滤色片确定之后,组成滤色器的其他后续滤色片的选择标准是通过条件数最小原则实现的^[2]。第二为 U_F (Uniformity of the peaks distribution, UF),即滤色器各滤色片峰值对应波长分布的均匀度(可简称为峰值均匀度指数),峰值波长分布越均匀, U_F 的取值越接近于 1。第三为 P_{OL} (Adjacent Filter Overlap Index, OLP),滤色器中各相邻滤色片的交叠度指数,相邻滤色片存在交叠时 P_{OL} 为一正小数,无交叠时则取值为负。和前期文

献相同,将后两个参数即 U_F 和 P_{OL} 称为滤色器的几何特征参数。 U_F 和 P_{OL} 的计算公式为

$$\begin{cases} U_F = 1 - \frac{\left| \sum_{i=1}^M (V_{\text{pfi}} - V_{\text{pri}}) \right|}{\sqrt{\left| \sum_{i=1}^M (V_{\text{pfi}}^2) \right| + \left| \sum_{i=1}^M (V_{\text{pri}}^2) \right|}}, \\ P_{\text{OL}} = 1 - \frac{\sum_{i=1}^M (\lambda_{\text{Rthri}} - \lambda_{\text{Lthri}}) - (\lambda_{\text{max}} - \lambda_{\text{min}})}{M(\lambda_{\text{max}} - \lambda_{\text{min}})} \end{cases}, \quad (6)$$

式中: V_{pfi} 和 V_{pri} 为以升序排列第 i 个透过率峰值处对应的波长; M 为多光谱相机的光谱通道数; λ_{Rthri} 和 λ_{Lthri} 为第 i 个滤色器光谱通带的左右阈值; λ_{max} 为兴趣光谱波段波长的最大值, λ_{min} 为相应的最小值,本文中兴趣光谱波段为可见光谱段, λ_{max} 和 λ_{min} 分别取 700 nm 和 400 nm。值得指出的是,计算左右阈值时,首先应将滤色器归一化,取归一化后峰值滤色片透过率峰值的 10%处对应波长。如图 1 所示,图 1(a)为含 8 个滤色片的滤色器的透过率曲线,图 1(b)为其归一化后对应的透过率曲线。

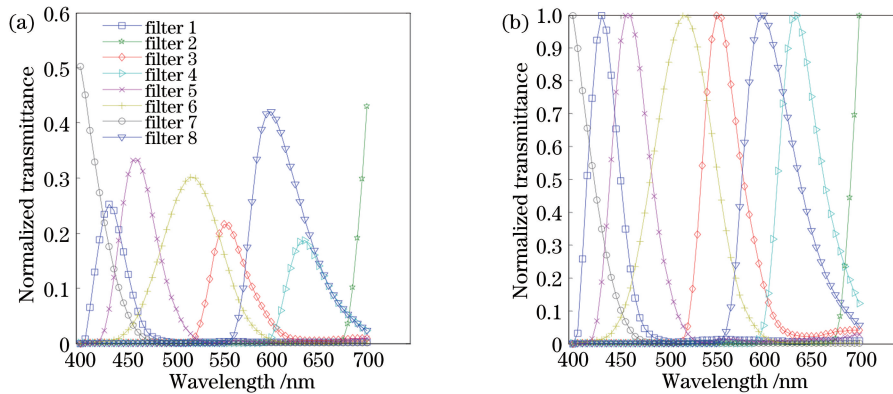


图 1 滤色器向量的归一化处理。(a)原始滤色器;(b)归一化处理后的滤色器

Fig. 1 Normalization of filter vector. (a) Original filters; (b) normalized filters

本文将给出 1035 组滤色器对应优选滤色器的上述三个参数,为实际滤色器的设计提供了直观的实验依据。

2.5 实验结果

除了首选滤色片的数目为 1035,反射率数据采用蒙塞尔(Munsell)色卡的 1269 个数据以外,其他实验数据、仿真条件和数据处理方法和文献^[2]相同,这里不再赘述。图 2 是 8 参数评价排序集分后,得到的集分最大的各通道对应滤色器的透过率曲线。表 1 列出了 6 通道下 1035 个滤色器中最优的前 15 个滤色器(Top1-15),给出了各自对应的滤色

器号码(Filter No.)、多参排序集分(score)、滤色器数值特征参数(N_{Cond} 、 U_F 和 P_{OL})以及多光谱相机的性能参数(R_{PSN} , C_{GF} , x_{MSE} , CIEDE2000)等,其中 AVE 表示平均值、STD 表示标准偏差。因各不同光谱通道的规律类似,仅在表 1 列出 6 通道的计算结果。表 2 给出了不同通道数目多光谱相机对应的最优滤色器的特征参数数值。其中,表 1 第 2~6 列和表 2 中,滤色器号码是根据 10 个噪声水平性能均值经多参排序集分的多目标优化处理后得到的,滤色器表征参数是对应滤色器透过率向量矩阵经(6)式计算得到的;表 1 中第 7~10 列相应滤色器的性

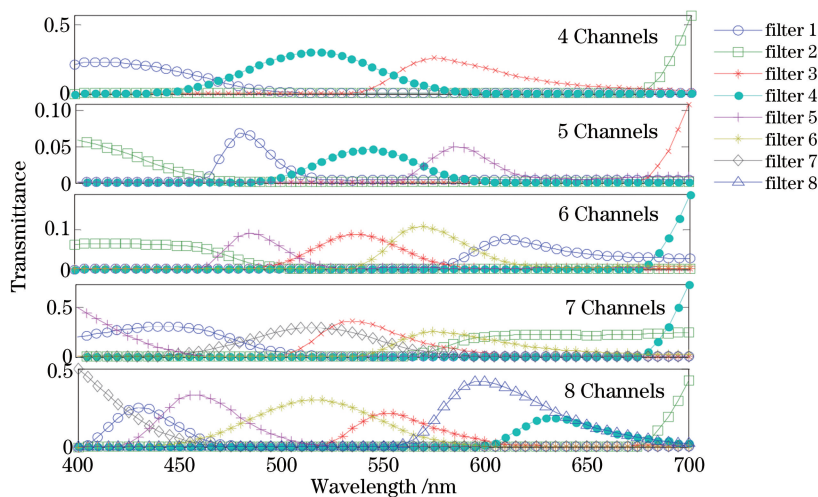


图 2 4~8 通道最优滤色器

Fig. 2 Optimal filters at 4-8 channels

表 1 6 个光谱通道下性能最好的前 15 个滤色器

Table 1 The first 15 color filters with the best performance under 6 spectral channels

Top	Filter No.	Score	N_{Cond}	U_F	P_{OL}	R_{PSN}	C_{GF}	χ_{MSE}	CIEDE2000
1	403	8115	1.85	0.990	0.085	48.77	0.9994	1.04×10^{-4}	0.69
2	589	8001	2.13	0.949	0.119	48.80	0.9993	1.17×10^{-4}	0.74
3	734	7998	2.05	0.931	0.070	48.74	0.9994	1.14×10^{-4}	0.84
4	825	7984	2.13	0.949	0.119	48.77	0.9994	1.17×10^{-4}	0.74
5	399	7914	1.61	0.990	0.098	47.46	0.9994	1.28×10^{-4}	0.77
6	803	7873	1.61	0.990	0.098	47.44	0.9994	1.30×10^{-4}	0.77
7	581	7831	1.87	0.972	0.056	49.00	0.9994	1.04×10^{-4}	0.99
8	434	7802	1.87	0.972	0.056	48.90	0.9994	1.05×10^{-4}	0.97
9	1032	7782	1.87	0.972	0.056	48.94	0.9994	1.04×10^{-4}	0.99
10	353	7669	2.10	1.000	0.077	47.79	0.9993	1.20×10^{-4}	0.94
11	1028	7666	2.49	0.929	0.094	48.52	0.9994	1.12×10^{-4}	0.85
12	735	7647	2.26	0.959	0.099	48.80	0.9995	1.11×10^{-4}	0.88
13	962	7640	2.35	0.912	0.101	48.32	0.9993	1.27×10^{-4}	0.88
14	843	7628	2.32	0.990	0.159	46.73	0.9993	1.68×10^{-4}	0.86
15	385	7627	2.33	0.952	0.135	47.77	0.9994	1.33×10^{-4}	0.84
AVE			2.06	0.964	0.095	48.32	0.9994	1.20×10^{-4}	0.85
STD			0.26	0.026	0.029	0.68	0.0542	0.16×10^{-4}	0.09

能结果,其对应的噪声水平为50 dB。

3 讨 论

前文通过多参数评价排序集分的多目标优化方法,从 1035 个不同滤色器中优选得到了最优滤色器,这些滤色器的数值特征和各通道性能的典型数

值可作为宽带滤色器的设计参考依据。

从图 2 可以看出,各通道滤色器透过率向量的几何特征和前期研究结果相同,即最优滤色器中各滤色片的透过率峰值波长在波长范围内均匀分布,相邻滤色片有一定的交叠。和前期的研究相比,由于本文采用反射率空间更大的 Munsell 色卡的

表 2 最优滤色器参数的量化特征

Table 2 Quantization characteristics of optimum filter parameters

Channels	Filter No.	N_{Cond}	U_{F}	P_{OL}
4	892	2.240	1.000	0.150
5	165	1.635	0.959	0.070
6	403	1.851	0.990	0.085
7	908	2.987	0.974	0.141
8	35	2.569	0.995	0.097
AVE		2.256	0.984	0.107
STD		0.444	0.014	0.029

1269 个反射率样本替代了 Macbeth 色卡的 24 个反射率样本,同时将待选滤色器集由 45 扩展至 1035 (即滤色器的首选滤色片为单片滤色片扩展至 2 片滤色片),有理由相信上述关于最优宽带滤色器几何特征的结论具有普遍性,这一推测可以从表 1 得到进一步证实。表 1 中,6 通道下 1035 个滤色器中排序靠前的 15 个优选滤色器的 N_{Cond} 、 U_{F} 和 P_{OL} 的均值分别为 2.06、0.964 和 0.095,条件数 N_{Cond} 为较小值,峰值均匀度 U_{F} 接近 1,相邻滤色片的交叠度指数 P_{OL} 为较小数;同时表 1 分别给出了 N_{Cond} 、 U_{F} 和

P_{OL} 的标准差,以及仿真条件下这些典型滤色器对应的多光谱相机的性能指标,即 R_{PSN} 、 C_{GF} 、 x_{MSE} 和 CIEDE2000 对应的数值。表 2 展示了不同通道下最优滤色器的表征参数,通过表征参数可以看出,随着通道数的变化,最优滤色器的 N_{Cond} 、 U_{F} 和 P_{OL} 参数在标线处非线性变化,但通过对应的统计量,即均值 AVE 和标准偏差 STD 的数值可以看出,其取值分布均被限定在较小的范围。

将首选滤色片由单片 45 个透过率向量扩展到 2 片并耦合至 1035 个透过率向量,其实质扩大了首选滤色片的向量空间,从原理上确保可以得到更为优化的滤色器。表 3 列出了三个不同噪声水平下 6 通道的多光谱相机在首选滤色片为 45 和 1035 下的性能表现,可以看出,首选滤色器向量空间越大,滤色器的性能越好;首选滤色片由滤色片改为双片耦合时,最优滤色器的性能有显著提高。因此,设计宽带滤色器时,足够多的透过率不同的滤色片是必要的;从装配实现角度考虑,可以将单通道滤色片的最大总数目由 3 改为 4,虽然相机的复杂度有一定的损失,但性能的提升是显著的。

表 3 多目标优化取得的 6 通道下的最优滤色器的性能

Table 3 Performance of optimum filter under 6 channels by multi-objective optimization

R_{SN}	R_{PSN}		C_{GF}		x_{MSE}		CIEDE2000	
	45	1035	45	1035	45	1035	45	1035
50 dB	44.72	48.77	0.9984	0.9994	2.8×10^{-4}	1.04×10^{-4}	1.05	0.69
40 dB	40.56	43.05	0.9897	0.9946	5.07×10^{-4}	2.18×10^{-4}	2.3	2.04
30 dB	32.46	34.87	0.9139	0.9447	2.8×10^{-3}	1.26×10^{-3}	6.22	5.98

表 4 给出了首选滤色片数目 N_{1st} 为 1035 和 45 时,前 15 个最优滤色器的描述参数对比。从表 4 可以看出首选滤色片向量空间扩大时,不同通道滤色器的描述参数的标准差均显著减小, N_{Cond} 的标准差

由 0.66 减小为 0.13, U_{F} 的标准差由 0.018 减为 0.006, P_{OL} 的标准差由 0.025 减小为 0.016。可见,首选滤色片空间增大时,最优滤色片的描述参数在数值上表现得更加稳定。

表 4 不同首选滤色片集下最优滤色器的量化特征比较

Table 4 Quantization characteristics of optimum filter with different preferred filter sets

N_{1st}	Channels	N_{Cond}	U_{F}	P_{OL}	N_{1st}	Channels	N_{Cond}	U_{F}	P_{OL}
1035	4	2.36	0.981	0.143	45	4	1.45	0.95	0.094
	5	2.15	0.96	0.104		5	2.56	0.983	0.176
	6	2.06	0.964	0.095		6	2.31	0.937	0.12
	7	2.34	0.962	0.104		7	3.01	0.983	0.142
	8	2	0.975	0.094		8	3.62	0.984	0.132
	AVE	2.18	0.968	0.108		AVE	2.59	0.967	0.133
	STD	0.13	0.007	0.016		STD	0.66	0.018	0.025

进一步,从滤色器本身来判断其优化程度时,仅通过最小化滤色器条件数 N_{Cond} 是不够的,这个结论已被前期研究和本文实验所证实,同时还要结合滤色器几何参数特征即滤色器的峰值均匀度 U_F 和相邻滤色器的交叠度指数 P_{OL} 来综合确定。显然,通过滤色器属性参数来挑选宽带滤色片,实现滤色器优化设计时,本文实验结果可作为相应的数值参照。

4 结 论

在前期研究的基础上,引入了多目标优化的思想方法,在多光谱相机宽带滤色片优化选取方面得到了量化结果。除了滤色器向量矩阵的条件数 N_{Cond} 外,描述滤色器透过率曲线几何特征的峰值均匀度指数 U_F 和相邻滤色片交叠度指数 P_{OL} 也是宽带滤色器选择时必要考虑的参数,这几个参数可以直接通过滤色器向量矩阵计算得出,从而避免了大量成像仿真计算。所得结论为类似的宽带滤色片的定量选取提供了典型参考值。和 45 个单片滤色片作为首选滤色片相比,含 2 片耦合的 1035 个滤色片向量集可以有更多的滤色片组合形式,因此滤色器性能得到较大提高,本文从理论和实验两方面证实了这一结论。采用了蒙塞尔色卡 1269 个典型反射率作为成像样本,和前期研究中采用的 24 个 Macbeth 色卡相比,所得结论的适用性范围更广。

参 考 文 献

- [1] Li S X. Study on some problems of multispectral color imaging [D]. Beijing: Beijing Institute of Technology, 2007: 18-23.
李遂贤. 多光谱彩色成像若干问题研究[D]. 北京: 北京理工大学, 2007: 18-23.
- [2] 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.
- [3] Marler R T, Arora J S. Survey of multi-objective optimization methods for engineering[J]. *Structural and Multidisciplinary Optimization*, 2004, 26(6): 369-395.
- [4] Giagkiozis I, Fleming P J. Methods for multi-objective optimization: an analysis [J]. *Information Sciences*, 2015, 293: 338-350.
- [5] di Pierro F, Khu S T, Savi D A. An investigation on preference order ranking scheme for multiobjective evolutionary optimization[J]. *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*, 2007, 11(1): 17-45.
- [6] Hardeberg J Y. Acquisition and reproduction of color images: colorimetric and multispectral approaches [M]. USA: Universal-Publishers, 2001.
- [7] Zeng W S, Zheng J Z, Zhou X M. Spectral reconfiguration of lighting based on nonvisual and visual effects[J]. *Acta Optica Sinica*, 2019, 39(10): 1033001.
曾伟森, 郑锦泽, 周晓明. 基于非视觉和视觉效应的照明光谱重构研究[J]. *光学学报*, 2019, 39(10): 1033001.
- [8] Chen Y Y, Xu H S, Zhang X D, et al. Study of spectral reconstruction based on digital camera [J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, 29(5): 1416-1419.
陈奕艺, 徐海松, 张显斗, 等. 基于数码相机的光谱重构研究[J]. *光学学报*, 2009, 29(5): 1416-1419.
- [9] Bo C X, Li J X, Meng X, et al. Spectrum recovery method for hyperspectral imaging based on symmetric wedgy interferometric cavity [J]. *Acta Optica Sinica*, 2016, 36(2): 0230004.
柏财勋, 李建欣, 孟鑫, 等. 对称楔形干涉高光谱成像的光谱复原方法[J]. *光学学报*, 2016, 36(2): 0230004.
- [10] Jing J J, Xiangli B, Lü Q B. Analysis on spectrum recovery for nonuniform sampling interferogram [J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, 31(12): 1211006.
景娟娟, 相里斌, 吕群波. 非均匀采样干涉数据的光谱反演分析[J]. *光学学报*, 2011, 31(12): 1211006.
- [11] MathWorks. Goodness of fit between test and reference data[EB/OL]. [2019-08-29]. <https://cn.mathworks.com/help/ident/ref/goodnessoffit.html>.
- [12] Maloney L T, Wandell B A. Color constancy: a method for recovering surface spectral reflectance[J]. *Journal of the Optical Society of America A*, 1986, 3(1): 29-33.
- [13] López-Álvarez M A, Hernández-Andrés J, Valero E M, et al. Selecting algorithms, sensors, and linear bases for optimum spectral recovery of skylight [J]. *Journal of the Optical Society of America A*, 2007, 24(4): 942-956.
- [14] 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.
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.
- [15] Cao X, Yue T, Lin X, et al. Computational snapshot multispectral cameras: toward dynamic capture of the spectral world[J]. *IEEE Signal Processing Magazine*, 2016, 33(5): 95-108.
- [16] Imai F H, Rosen M R, Berns R S. Comparative study of metrics for spectral match quality [C] // Conference on Colour in Graphics, Imaging, and Vision, April 2-5, 2002, Poitiers, France. [S.l.: s. n.], 2002: 492-496.
- [17] Wyszecki G, Stiles W S. Color science: concepts and methods, quantitative data and formulae [M]. New York: John Wiley and Sons, 1983.