

文章编号:1002-2082(2015)05-0728-07

基于多区间映射评价优选的光谱数据融合显示算法

朱院院,高教波,高泽东,吴江辉,孟合民

(西安应用光学研究所,陕西 西安 710065)

摘要:研究降维、去冗后光谱数据色彩显示问题。传统的光谱数据色彩显示时,常采用截取或压缩至0~1范围进行映射,容易丢失图像细节,提出一种基于多区间平移映射评价优选方法的光谱数据色彩融合显示算法。首先对光谱数据立方体进行主成份变换,将前三成分分别赋值给对色空间的黑白通道、红绿通道和黄蓝通道,然后经过空间变换到sRGB空间,将数据分段平移到0~1范围,映射至8位RGB空间,并对每次平移映射图像进行标准差、熵、平均梯度的单项评价,全部平移结束后,对所有的评价值进行综合评价,选取综合评价值最高的区间输出映射。实验结果表明,融合图像能最大限度地保证图像的能量、信息和清晰度,有利于人眼的快速识别判断。

关键词:光谱学;融合显示;评价优选;数据立方体;成像光谱;颜色映射

中图分类号:TN911.73;TP751.1

文献标志码:A

doi:10.5768/JAO201536.0502001

Fusion and vision algorithm of spectral data based on mapping-evaluating-optimizing methods within multi-section

Zhu Yuanyuan, Gao Jiaobo, Gao Zedong, Wu Jianghui, Meng Hemin

(Xi'an Institute of Applied Optics, Xi'an 710065, China)

Abstract: Color vision of spectral data after reducing dimension and redundancy was researched. The traditional mapping method, cutting or compressing data into the range between 0 and 1, can always lead to loss of the fusion image details. A novel fusion and vision algorithm of spectral data was presented, based on the shifting-mapping-evaluating-optimizing way within multi-section. The first 3 principal component values were achieved by principal component transform (PCT) of the spectral data cube, and assigned respectively to white-black, red-green and yellow-blue channels of opponent color space. The values of standard red-green-blue (sRGB) color space were transformed from opponent color space, and the sRGB values were divided into several sections, moved to the range of 0 to 1 and mapped to 8-bit RGB digital code values. The single item evaluations of standard deviation, entropy, average gradient were calculated from 8-bit RGB. The comprehensive evaluation values were got from all of the single item evaluation after finishing the process of moving, mapping and single item evaluation. The fusion image was mapped at the section with maximum comprehensive evaluation. The results show that the fusion image can ensure the image's energy, information and definition, which is useful for manual distinguish and judge rapidly.

Key words: spectroscopy; fusion and vision; evaluating and optimizing; data cube; imaging spectra; color mapping

收稿日期:2015-02-25; 修回日期:2015-05-12

基金项目:国防预先研究项目资助

作者简介:朱院院(1979—),女,博士研究生,讲师,主要研究方向为光谱目标实时检测、融合等方面的研究。

E-mail:zhuyuanme@126.com

引言

成像光谱数据融合伪彩色图像是直观有效的光谱数据应用方式之一,融合处理提供的伪彩色图像便于人眼观察识别。光谱数据融合显示首先需要光谱数据降维,再将降维数据融合成一幅伪彩色图像。传统的降维数据融合方法是将降维后包含最多信息的3幅图像分别赋值给RGB显示模型,该方式没有充分考虑降维数据的特点和人眼对不同颜色的区分能力。在所有的颜色空间中,对色空间和人眼的视觉感受和心理感知较为一致^[1-4]。文献[5]将主成分变换(principal component transform,PCT)后的降维数据转换到HSV(hue-saturation-value)颜色空间,直接压缩至有效范围映射;文献[6]将对色空间转换到RGB三色空间,最后简单截取部分数值映射,得到最终的融合显示图像。数值压缩方式产生的融合图像对比度低,人眼不易区分图像细节;简单截取映射方式产生的融合图像,虽然融合图像对比度高,但是截取的信息不能保证融合图像质量最优,容易造成类似光谱目标混叠不易区分。

针对传统伪彩色图像显示容易导致目标混杂不易区分的缺陷,本文提出一种基于多区间平移映射评价优选方法的光谱数据色彩融合显示算法。PCT降维数据分配给对色空间,分区间平移映射颜色数据,同步进行图像评价,最后对所有评价价值进行综合评价,选取综合评价最高的平移量作为最优平移量,利用3个最优平移量分别平移映射各通道颜色数据,获取图像能量、信息、清晰度综合最优的融合图像。

1 超光谱融合显示原理

光谱数据立方体经过去冗、降噪、降维,得到最能反映光谱特征的降维数据,再赋值给相应的颜色空间,最后转换到RGB空间存储显示,其原理如图1所示。常用的光谱数据降维方法有波段选择法、PCT法、独立成分分析(independent component analysis, ICA)等,其中PCT方法有严密理论推导,无迭代运算,受到广泛关注。本文采用PCT实现光谱数据降维。

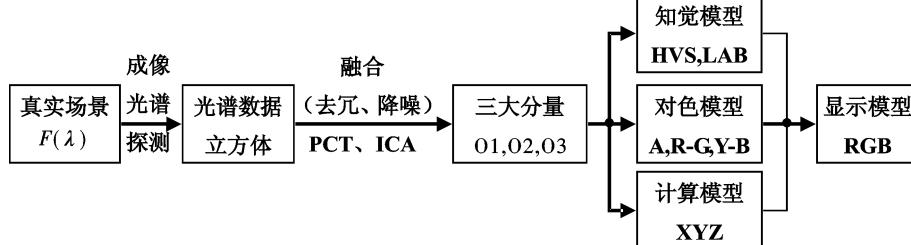


图1 光谱成像及融合显示过程

Fig. 1 Process of spectral imaging, fusion and color show

降维数据转换到颜色空间是伪彩色显示的关键,关系到融合结果与人视觉感知是否一致,人眼能否感知融合结果中的各类目标。PCT前三成分不相关,能量由强到弱;而人眼对色空间的黑白通道O1、红绿通道O2、黄蓝通道O3也不相关,能量也由强到弱。PCT前三成分与人眼的对色空间的特性基本一致,可以将PCT三大主成分分配给O1、O2、O3。

根据对色空间到RGB图像的转换关系^[1-4,7],不难推导出对色空间O1 O2 O3到sRGB空间的转换关系:

$$\begin{bmatrix} R_s \\ G_s \\ B_s \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1.8063 & -5.8827 & -0.5766 \\ 0.6472 & 2.8929 & 0.1928 \\ 0.4103 & -0.0706 & 1.2418 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 01 \\ 02 \\ 03 \end{bmatrix} \quad (1)$$

最后再进行非线性变换,将标准sRGB颜色空

间映射到8位RGB空间^[6],得到最终的显示结果。

如果 $R_s, G_s, B_s \leqslant 0.003\ 04$,

$$\begin{cases} R'_s = 12.92 \times R_s \\ G'_s = 12.92 \times G_s \\ B'_s = 12.92 \times B_s \end{cases} \quad (2)$$

如果 $R_s, G_s, B_s > 0.003\ 04$,

$$\begin{cases} R'_s = 1.055 \times R_s^{1.0/2.4} - 0.055 \\ G'_s = 1.055 \times G_s^{1.0/2.4} - 0.055 \\ B'_s = 1.055 \times B_s^{1.0/2.4} - 0.055 \end{cases} \quad (3)$$

最后,非线性sR'G'B'值按照下式转换成数字编码值:

$$\begin{cases} R_{8bit} = 255.0 \times R'_s \\ G_{8bit} = 255.0 \times G'_s \\ B_{8bit} = 255.0 \times B'_s \end{cases} \quad (4)$$

值得注意的是上述映射过程中,只截取映射

了[0,1]区间内的 sRGB 数值, 小于 0 和大于 1 的值没有处理, 这种简单截取的映射方式有时并不能获得最佳的视觉显示效果。

2 多区间融合评价优选显示算法

2.1 平移映射方法

为了映射 sRGB 的数值范围的所有数值, 采用多区间平移映射的方式进行 sRGB 标准色彩空间到 RGB 显示空间的映射, 即每次仅取 sRGB 数值范围内的一部分值平移到[0, 1]区间内, 综合评价每次平移映射后的图像质量, 最终选取图像最优的区间进行映射。

对色空间 O1 O2 O3 变换到 sRGB 空间后, R_s 的最小值记为 R_{\min} , 最大值记为 R_{\max} , 平移公式为

$$\begin{cases} R_n = (R - R_{\min}) - \Delta R \times i \\ i = 0 \sim N_R \\ N_R = [(R_{\max} - R_{\min}) / \Delta R] + 1 \end{cases} \quad (5)$$

式中: R_n 是平移后的值; ΔR 是平移步长; N_R 是平移的总步数; i 是步数计数值。

记平移量:

$$M = R_{\min} + \Delta R \times i \quad (6)$$

则有:

$$R_n = R - M \quad (7)$$

图 2 为平移映射原理示意图, 当步数计数值 i 为 0 时, R 取值 $[R_{\min}, R_{\min} + 1]$, 对应 R_n 取值 [0, 1], 代入(2)~(4)式的 R_s 进行非线性变换映射, 即相当于 $[R_{\min}, R_{\min} + 1]$ 范围内的值被平移映射; 当 i 为 1 时, R 取值 $[R_{\min} + \Delta R, R_{\min} + \Delta R + 1]$ 范围被平移映射; 当 i 为 2 时, R 取值 $[R_{\min} + 2\Delta R, R_{\min} + 2\Delta R + 1]$ 范围被平移映射; 依次平移 R 范围的所有值将以 ΔR 为平移步长全部进行分段平移映射。

每次平移映射后都将得到一幅融合图像, R_s 平移后将得到 N_R 幅图像, 同理 G_s, B_s 平移后将得到 N_G, N_B 幅图像, 总计得到 $N_R \times N_G \times N_B$ 幅伪彩色图像, 如果采用人工判别图像的质量将会有很

大的工作量, 本文对每幅伪彩色图像进行客观评价, 最后将评价值最高的一幅作为最终的融合结果图像。

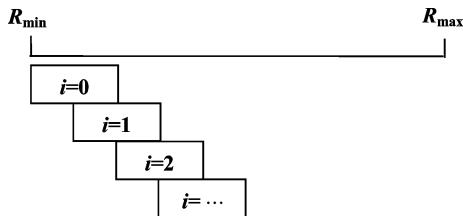


图 2 平移映射原理

Fig. 2 Principle of shift mapping

2.2 融合图像综合评价

目前, 融合图像的客观质量评价方法有很多, 有基于图像信息量的熵、交叉熵、相关熵、联合熵, 有基于图像能量分布的均值、标准差、均方差、协方差, 有基于图像信号质量的信噪比、峰值信噪比, 有基于清晰度的平均梯度、空间频率的多种评价方法^[9-10]。但是这些单独的评价方法一般侧重于一个方面, 没有起到综合效应; 有的评价方法较难操作, 不适用于融合图像的评价; 有的评价结果和人眼的视觉效果不一致。

本文提出一种“评价、打分、综合”的综合评价方法, 每次平移映射后, 分别计算每次的标准差值 V_{std} 、熵值 V_{ent} 、平均梯度值 V_{avg} , 全部平移映射结束后, 对单项评价值进行打分, 记作:

$$y = E(x) \quad (8)$$

不同类型的评价值数值范围不同, 难以综合评价, 因此需要再次“打分”, 本文采用排序打分的方法, 即评价值的最小分值为 1, 最大分值为评价值的个数。最后进行综合评价:

$$E = E(V_{\text{std}}) + E(V_{\text{ent}}) + E(V_{\text{avg}}) \quad (9)$$

表 1 为采用综合评价方法的示意表, 表中平移量 M 为 1.0 的综合评价值 E 为最大值 13, 将此时的平移量 M 代入(7)式, 即可得到最优的融合映射结果图。

表 1 综合评价示意表

Table 1 Principle chart of comprehensive evaluation

序号	平移量	标准差	熵	平均梯度	标准差分数	熵分数	梯度分数	综合评价值
0	-2.0	81.5	0.81	31.5	1	2	1	4
1	-1.0	83.0	0.90	47.0	2	3	2	7
2	0.0	88.4	0.92	48.2	4	5	3	12
3	1.0	89.0	0.91	48.5	5	4	4	13
4	2.0	88.0	0.75	49.8	3	1	5	9

2.3 算法实现

算法实现流程如图 3 所示。

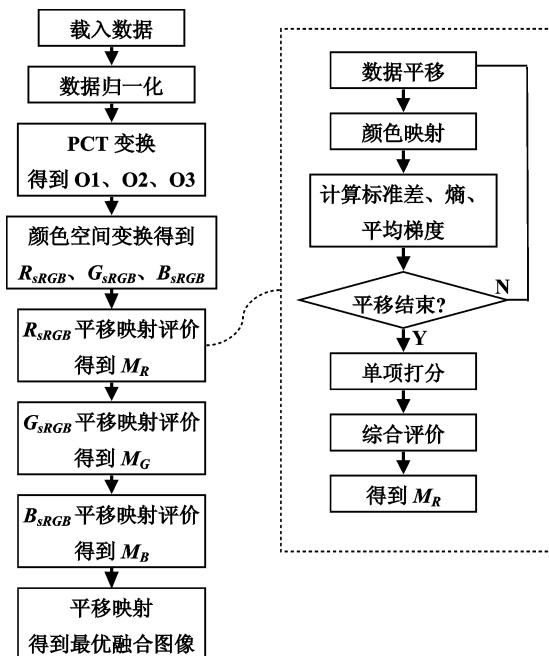


图 3 显示算法流程图

Fig. 3 Flow chart of fusion and show algorithm

具体实现过程如下：

- 1) 初始化：设置平移步长 $\Delta R = 0.5$ ，载入超光谱数据，并进行归一化处理；
- 2) 光谱数据降维：对超光谱数据进行主成份变换，得到变换后的前 3 个主分量；
- 3) 空间变化：将 PCT 后的第一主分量赋给对色空间的黑白通道 O1，第二主分量赋给对色空间的红绿通道 O2，第三主分量赋给对色空间的黄蓝通道 O3，通过(1)式将对色空间数据变换到 sRGB 空间，得到 R_s, G_s, B_s ；
- 4) 红色分量平移映射评价，得到红色分量的最优平移量 M_R ：采用(5)式对 R_s 进行平移操作，每

次平移后，采用(2)式～(4)式进行映射，并进行标准差、熵、平均梯度的单项评价；平移结束后，采用(8)式～(9)式进行单项打分和综合评价，通过最优评价值 E_R 得到图像质量最优时的红色分量平移量 M_R ；

5) 绿色分量平移映射评价，得到绿色分量的最优平移量 M_G ，方法同步骤 4)；

6) 蓝色分量平移映射评价，得到蓝色分量的最优平移量 M_B ，方法同步骤 4)；

7) 最优图像融合映射：将 M_R, M_G, M_B 分别代入(7)式，得到平移后的 R_s, G_s, B_s ；通过(2)式～(4)式映射最优的融合图像。

3 实验结果及分析

实验设备采用自研的可见光成像光谱仪^[11-12]，波段范围： $0.4 \mu\text{m} \sim 0.9 \mu\text{m}$ ，空间分辨率：491 像素(h) \times 674 像素(w)，窄带数目：61。实验对象为 6 种不同 $500 \text{ mm} \times 500 \text{ mm}$ 的迷彩靶布，近景全色图像如图 4 所示；天气晴朗，实验距离 100 m；采集的光谱数据立方体经过归一化和 PCT 变换后，前 3 个主分量如图 5 所示。

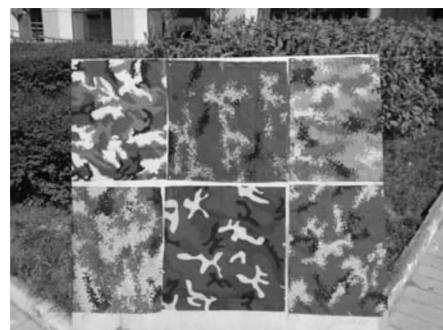


图 4 六种迷彩靶布的真彩色图像

Fig. 4 True color image of 6 kinds of target fabric

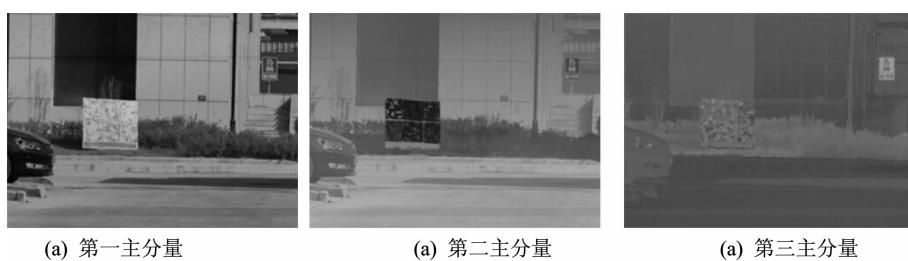


图 5 三大主分量图

Fig. 5 First 3 components images after PCT

3.1 不同映射方法的比较

为了验证本文的融合显示算法，本文选择与 Tirance Achalakul 于 2000 年提出的对色空间映射方法^[8]、J. Scott Tyo 于 2003 提出的

HSV 映射方法^[5]以及简单截取 $[0, 1]$ 区间映射方法进行对比，图 6 是 4 种不同映射方法的结果图像，表 2 是针对迷彩靶板的评价价值对比表。

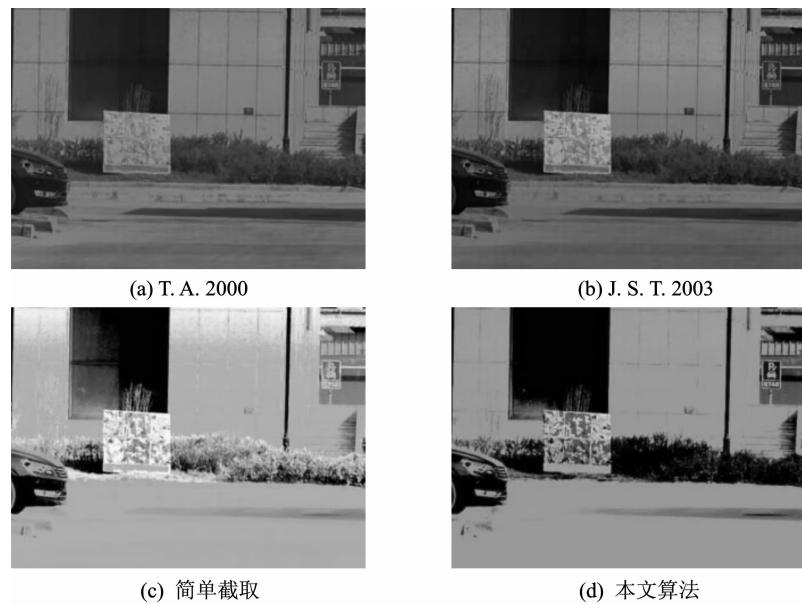


图 6 4 种方法的映射图

Fig. 6 Images of 4 mapping ways

首先人眼视觉观察图 6,其中图 6(a)、图 6(b)和图 6(c)可以看出迷彩靶布颜色基本成单一色调,融合结果不能表示靶布之间的区别,而图 6(d)一眼就看出靶布之间的颜色区间。图 6 的 T. A. 2000 和 J. S. T. 2003 的两种映射方法整体色调柔和,能概要性地显示全部场景的信息内容,但图像的对比度低,迷彩靶板细节人眼不易区分;而简

单截取和本文算法图像对比度高,明暗对比强烈,体现了截取映射方式的特点;简单截取方式只是截取[0, 1]区间直接映射,但截取的这部分信息内容不最优,丢失了迷彩靶的细节;本文采用的算法遍历了所有可能的值,再优中选优,得到的图像最能反映图像的细节。

表 2 四种映射方式的性能比较

Table 2 Performance comparison among 4 mapping ways

映射显示方法	R 标准差	R 熵	R 梯度	G 标准差	G 熵	G 梯度	B 标准差	B 熵	B 梯度
T. A. 2000	24.646 6	6.546 5	10.274 0	45.833 7	7.147 7	14.452 0	18.156 9	6.154 6	8.986 0
J. S. T. 2003	47.541 9	7.201 3	15.548 9	40.327 6	7.013 7	16.277 3	30.082 7	6.738 9	10.803 7
简单截取	92.1380	1.138 8	16.176 7	79.049 3	5.874 6	33.912 1	56.211 0	1.712 4	4.957 4
本文算法	113.2561	4.097 6	44.854 9	106.992 4	4.639 7	43.671 9	73.075 3	6.787 3	35.385 2

再从表 2 迷彩靶板的评价值可以看出,相对于其他方法,本算法的评价值除了熵值稍有降低,其他都明显占优,说明本算法对比度和清晰度都明显优于其他方法,尽管图像的信息量有所降低,但人眼更易区分迷彩靶细节,这与人眼的视觉识别效果一致。

表 3 列出了 4 种方案的运行时间模型及测试时间, T_1 表示 PCA 运行时间; T_2 表示空间变换时间; T_3 表示数字图像变换时间; T_4 表示颜色空间变换时间; T_5 表示截取数据时间; T_6 表示平移映射时间。在 i5-3470@3.20GHz 四核 CPU 计算机上,

采用 Matlab R2007a 软件平台测试了 4 种方法的运行时间,由表 3 可知,前 3 种的方法运行时间几乎一致,本算法虽然时间开销稍长,但仍远远小于 1 个光谱数据立方体的获取时间 6.74 s,适用于超光谱数据实时探测应用。

表 3 4 种映射方式的运行时间对比

Table 3 Run time comparison among 4 mapping ways

映射显示方法	计算时间模型	运行时间/s
T. A. 2000	$T_1 + T_2 + T_3$	1.032
J. S. T. 2003	$T_1 + T_2 + T_3$	1.11
简单截取	$T_1 + T_4 + T_5 + T_3$	1.048
本文算法	$T_1 + T_4 + T_6 + T_3$	1.719

3.2 不同区间映射结果比较

本文的最优结果为平移步数 R 通道是 7,G 通道是 12,B 通道是 7,图 7 列出了 G 通道、B 通道平移位置保持不变,R 通道平移步数从 5 至 8 时的映射结果图。从图中可以看出,图(a)的蓝、绿分量占多,红色分量少,靶板之间的区分度不大,随着平移量的增加,靶板位置的红色明显增加,蓝、绿色明显减少,而图(d)的红色成分太多又不能很明区分靶板之间的区别。表 4 列出了程序运行过程中的综合评价值,由表 4 可以看出 R 通道平移步数为 7 时的综合评价值最高,最终映射时选择平移量为 -4.1021 进行映射图像最优,这与图 7 的人眼识别效果一致。

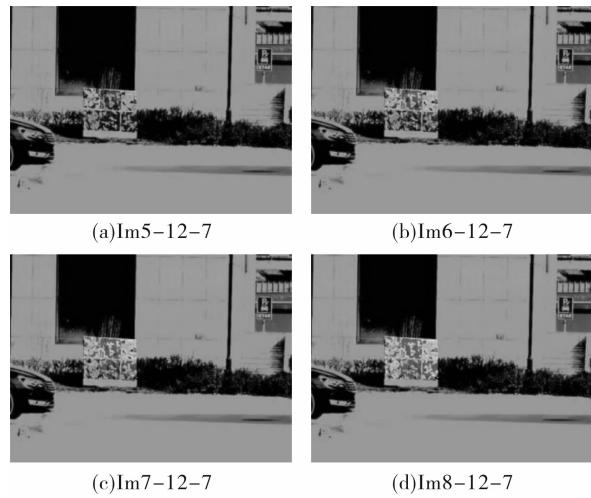


图 7 R 通道不同区间的映射图

Fig. 7 Varied section mapping images of R channel

表 4 R 通道部分综合评价示意表

Table 4 Part of comprehensive evaluation values of R channel

序号	平移量	标准差	熵	平均梯度	标准差分数	熵分数	梯度分数	综合评价值
...
4.0	-5.602 1	41.776 2	1.150 5	16.033 9	17.0	20.0	18.0	55.0
5.0	-5.102 1	77.674 6	3.050 4	34.518 3	19.0	27.0	27.0	73.0
6.0	-4.602 1	104.144 4	4.324 4	45.964 4	25.0	30.0	30.0	85.0
7.0	-4.102 1	113.256 1	4.097 6	44.854 9	30.0	29.0	29.0	88.0
8.0	-3.602 1	112.331 3	3.129 9	37.042 7	29.0	28.0	28.0	85.0
9.0	-3.102 1	109.508 9	2.126 0	28.362 5	28.0	26.0	26.0	80.0
10.0	-2.602 1	107.174 7	1.493 7	22.715 8	27.0	25.0	25.0	77.0
...

3.3 不同平移步长的比较

(5) 式的 ΔR 平移步长影响最终的映射结果,值得注意的是平移步长为 1 时,平移区间无重叠,平移步长小于 1 时,平移区间有重叠,平移步长越小,重叠的区域越多,但这种重叠平移确是有益的,因为 sRGB $[0, 1]$ 的值转换 RGB $[0, 255]$ 时,接近 0 和 255 的灰度值对人眼的区分识别是不敏感的,因此平移步长为 1 时会丢失一部分最优图像,理论上讲平移步长越小越好,但这会引起计算量的急剧增加。图 8 列出了平移步长分别为 1、0.8、0.5、0.3 的融合结果图像,可以看出平移步长为 0.5(图 8(c))靶板颜色区分度要明显优于平移步长为 1(图 8(a))和 0.8(图 8(b))的图像,但是与平移步长 0.3(图 8(d))的图像区别不大。

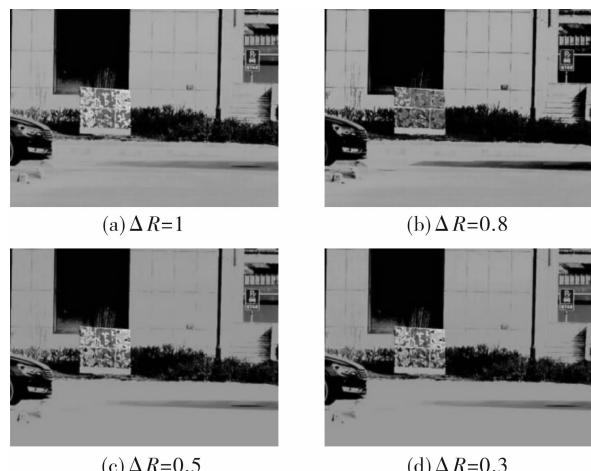


图 8 不同平移步长的最优映射图

Fig. 8 Optimized mapping images with different moving steps

表 5 列出了不同平移步长的性能比较表,数值

评价结果与人眼评价结果基本一致。

表 5 不同平移步长的性能比较

Table 5 Performance comparison with different moving steps

平移步长	通道	序号	平移量	标准差	熵	平均梯度
1	R	4.0	-3.6021	112.3313	3.1299	37.0427
	G	6.0	-0.4102	106.9924	4.6397	43.6719
	B	4.0	-0.4973	68.4148	5.6790	17.3630
0.8	R	4.0	-4.4021	109.6239	4.3776	46.5175
	G	7.0	-0.8102	99.4306	3.4789	40.3110
	B	5.0	-0.4973	68.4148	5.6790	17.3630
0.5	R	7.0	-4.1021	113.2561	4.0976	44.8549
	G	12.0	-0.4102	106.9924	4.6397	43.6719
	B	7.0	-0.9973	73.0753	6.7873	35.3852
0.3	R	11.0	-4.3021	111.3330	4.3434	46.3089
	G	20.0	-0.4102	106.9924	4.6397	43.6719
	B	12.0	-0.8973	72.1687	6.8726	31.8585

4 结论

光谱数据融合及色彩显示是超光谱成像传感器实时应用的关键因素。本文提出的光谱数据色彩融合显示算法,通过分段平移、映射、评价、优选的方法保证最终映射图像质量在可选择范围内最优。既避免了直接截取颜色数据 0~1 部分数据,进行数字映射容易导致小于 0 的低能量目标和大于 1 的高能量目标不能在融合图像中区分显示的缺点;也解决了颜色数据整体压缩到 0~1 范围,进行数字映射图像对比度整体较低,细节人眼不易区分的缺陷。实验结果表明:该算法能显著提高融合图像的能量和清晰度,融合图像的对比度高,细节区区分明显,有利于人眼的快速识别判断。该算法原理简单,易于实现,在超光谱成像传感器的实时侦察中具有广泛的应用前景。

参考文献:

- [1] Bratkova M, Boulos S, Shirley P. oRGB: A practical opponent color space for computer graphics [J]. IEEE Computer Graphics and Applications, 2009, 29(1): 42-55.
- [2] Johnson G M, Song X, Montag E D, et al. Derivation of a color space for image color difference measurement[J]. Color Research and Application, 2010, 35(6): 387-400.
- [3] Reinhard E, Ashikhmin M, Gooch B, et al. Color transfer between images[J]. IEEE Computer Graphics and Applications, 2001, 21(5): 2-9.
- [4] Livitz G, Yazdanbakhsh A, Eskew R T, et al. Perceiving opponent hues in color induction displays[J]. Seeing and Perceiving, 2011, 24(1): 1-17.
- [5] Tyo J S, Konsolakis A, Diersen D I. Richard christopher olsen: principal-components-based display strategy for spectral imagery[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2003, 41(3): 1-12.
- [6] Stokes M, Anderson M, Chandrasekars, et al. A standard default color space for the internet: sRGB [EB/OL]. <http://www.color.org/sRGB.xalter>. [1996-11-5]. version: 1-10.
- [7] Fairchild M D. Color appearance models[M]. 3nd ed. West Sussex: John Wiley & Sons, 2013.
- [8] Achalakul T, Taylor S. A concurrent spectral-screening PCT algorithm for remote sensing application[J]. Journal of Information Fusion, 2000, (1/2): 89-97.
- [9] Chen Dake. Fusion algorithm of multispectral and panchromatic images [D]. Jilin: Jilin University, 2010.
陈大可. 多光谱与全色图像融合方法的研究[D]. 吉林: 吉林大学, 2010.
- [10] Yang Fanglin, Guo Hongyang, Yang Fengbao. Study of evaluation methods on effect of pixel-level image fusion[J]. Journal of Test And Measurement Technology, 2002, 16(4): 276-279.
阳方林, 郭红阳, 杨风暴. 像素级图像融合效果的评价方法研究[J]. 测试技术学报, 2002, 16(4): 276-279.
- [11] Zhang Mingxuan, Gao Jiaobo, Meng Hemin, et al. Zoom-FFT based on Fourier transform spectroscopy [J]. Journal of Applied Optics, 2013, 34 (3): 452-456.
张茗璇, 高教波, 孟合民, 等. 基于傅里叶变换光谱技术的 Zoom-FFT 算法研究[J]. 应用光学, 2013, 34 (3): 452-456.
- [12] Li Yu, Gao Jiaobo, Meng Hemin, et al. Fast inversion techniques of interferogram imaging spectrum base on CUDA[J]. Journal of Applied Optics, 2014, 35(3): 414-419.
李宇, 高教波, 孟合民, 等. 基于统一计算设备架构的干涉成像光谱快速反演技术研究[J]. 应用光学, 2014, 35(3): 414-419.