

# 基于解系数矩阵的背景颜色校正

冉建国, 刘珩\*, 吕振坚, 王苏红, 曾朝阳

陆军工程大学电磁环境效应与光电工程国家级重点实验室, 江苏 南京 210007

**摘要** 数码相机等图像采集设备受系统参数、拍摄条件等的影响,与真实背景间出现偏色、失真现象,给迷彩伪装自动配色带来较大误差。为解决这一误差,基于自制 98 块绿色色板,通过将数码相机成像设备采集的色板色度值作为自变量,将测试光谱获取的真实颜色色度值作为因变量,构建系数矩阵方程,求解矩阵系数,应用该系数矩阵对背景进行颜色校正。结果表明,数码设备采集的图像颜色信息经过系数矩阵校正后,与真实背景颜色的平均色差  $\Delta E_{L^*a^*b^*}$  小于 3,满足伪装性能要求,这为高融合迷彩伪装背景颜色复制技术提供了坚实的基础。

**关键词** 图像处理; 颜色校正; 迷彩伪装; 回归分析; 系数矩阵

中图分类号 TP751

文献标志码 A

doi: 10.3788/LOP202259.0210006

## Background Color Correction Based on Coefficient Matrix

Ran Jianguo, Liu Heng\*, Lü Zhenjian, Wang Suhong, Zeng Zhaoyang

National Key Laboratory on Electromagnetic Environmental Effects and Electro-Optical Engineering,  
Army Engineering University of PLA, Jiangsu, Nanjing 210007

**Abstract** System parameters and shooting conditions influence digital cameras and other image acquisition equipments. With a real background, a partial color and distortion phenomenon results in a large error in automatic color matching. In this study, we made 98 green swatches. The chromaticity value of swatch acquired using digital camera imaging equipment was considered an independent variable, whereas the true color chromaticity value obtained from the test spectrum was considered a dependent variable. Then, a coefficient matrix equation was constructed and solved. The resulting coefficient matrix was used for background color correction. The results show the image color information obtained by digital equipment after the application of the correction coefficient matrix. In addition, the average color difference with real background color is less than 3, which meets the requirements of camouflage performance and lay the foundation for the high fusion camouflage background color reproduction technology.

**Key words** image processing; color correction; camouflage; regression analysis; coefficient matrix

## 1 引言

背景颜色信息的准确获取与快速复制是高融合迷彩伪装技术实现的关键。采用分光光谱仪测试反射光谱,再通过计算获取的颜色色度值,被认为是背景真实颜色信息的反映。但大型光谱仪因携带不方便,不适合野外测量;采用数码照相设备可方便获得

背景的颜色信息,但受设备参数、拍照条件等影响,其往往与真实背景间存在失真、偏色等现象,这给迷彩伪装自动配色带来很大误差,故需对其进行颜色校正。目前基于机器模拟人类视觉系统颜色恒常性的颜色校正算法,很多学者针对在图像动态数据均衡<sup>[1]</sup>、不同设备的颜色空间转换<sup>[2]</sup>、曲面反射导致的消色差<sup>[3]</sup>以及复杂环境下的图像颜色校正<sup>[4]</sup>开展了

收稿日期: 2021-02-26; 修回日期: 2021-03-01; 录用日期: 2021-03-10

通信作者: \*87829112@qq.com

大量研究,近年来 BP(back propagation)神经网络、多项式拟合、遗传算法在数字成像设备的色彩空间<sup>[5]</sup>、色彩管理<sup>[6]</sup>等颜色还原技术中得到广泛应用。而高融合迷彩伪装技术是基于背景光谱特征来拟合颜色的复制与还原,其立足于人眼色彩恒常性的颜色转换算法可减少成像设备与真实背景的偏色和失真这一结论,但若以输出的色度值复制背景色,则难以达到迷彩伪装中的色差要求。

本文通过自制与植被光谱特征相对应的绿色色板,构建由成像设备采集的颜色信息库与色板光谱数据库,建立采集颜色与真实颜色色度值的相关性方程,采用回归分析方法求解系数矩阵,再通过系数矩阵将任意拍摄的背景色度值校正还原为背景真实颜色,为迷彩伪装配色系统提供了接近背景的颜色度值,满足了高融合迷彩伪装技术的要求。

## 2 基本原理

### 2.1 颜色空间转换

采用分光光谱仪测试背景光谱数据,根据不同视场条件下的国际照明委员会(CIE)标准色度系统计算颜色三刺激值,是获取背景颜色信息最准确的方法。衡量是否为同种颜色有两种方法:若与背景颜色光谱曲线完全一致,则该颜色与背景“同谱同色”;反之若与背景颜色光谱曲线不一致,但在人眼视觉上同色,则称为“异谱同色”。中华人民共和国国家军用标准中规定满足伪装性能要求的迷彩色与背景在 1976  $L^*a^*b^*$  均匀颜色空间上的允许色差  $\Delta E_{L^*a^*b^*}$  为 3。根据光谱数据计算三刺激值,其公式为

$$\begin{cases} X = k \sum_{\lambda} \phi(\lambda) \bar{x}(\lambda) \Delta\lambda \\ Y = k \sum_{\lambda} \phi(\lambda) \bar{y}(\lambda) \Delta\lambda, \\ Z = k \sum_{\lambda} \phi(\lambda) \bar{z}(\lambda) \Delta\lambda \end{cases} \quad (1)$$

式中: $X$ 、 $Y$ 、 $Z$ 表示颜色的三刺激值; $k$ 为归一化系数; $\bar{x}$ 、 $\bar{y}$ 、 $\bar{z}$ 是 CIE 规定的标准色度观察者的光谱三刺激值; $\phi(\lambda)$ 为颜色刺激函数。当被测物体是非自发光物体时,颜色刺激函数  $\phi(\lambda)$  为

$$\phi(\lambda) = S(\lambda) R(\lambda), \quad (2)$$

式中: $S(\lambda)$ 为所采用的标准照明体的相对光谱功率分布; $R(\lambda)$ 为物体光谱反射系数。本文采用接近日光的 D65 光源数据,波长范围为 380~760 nm。

目前图像采集设备与显示器的通用色彩空间是 RGB 颜色空间,RGB 颜色空间与 XYZ 颜色空间的转化关系为<sup>[7]</sup>

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 2.7689 & 1.7517 & 1.1301 \\ 1.0000 & 4.5906 & 0.0601 \\ 0 & 0.0565 & 5.5942 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} R \\ G \\ B \end{bmatrix}. \quad (3)$$

已知颜色三刺激值,可根据(2)~(4)式计算该颜色在色空间中的明度  $L^*$ 、色度  $a^*$  和  $b^*$ ,表达式为

$$\begin{cases} L^* = 116 \times \left( \frac{Y}{Y_0} \right)^{1/3} - 16 \\ a^* = 500 \times \left[ \left( \frac{X}{X_0} \right)^{1/3} - \left( \frac{Y}{Y_0} \right)^{1/3} \right], \\ b^* = 200 \times \left[ \left( \frac{Y}{Y_0} \right)^{1/3} - \left( \frac{Z}{Z_0} \right)^{1/3} \right] \end{cases} \quad (4)$$

式中  $X_0$ 、 $Y_0$  和  $Z_0$  为选定参照白的三刺激值,其中  $X_0=95.04$ 、 $Y_0=100$ 、 $Z_0=108.88$ 。

CIE1976  $L^*a^*b^*$  均匀颜色空间及其色差公式在颜料、涂料、纺织印染等着色行业有着广泛的应用,在迷彩伪装中也有广泛的应用。CIE1976  $L^*a^*b^*$  色差计算公式为

$$\Delta E_{L^*a^*b^*} = [(\Delta L^*)^2 + (\Delta a^*)^2 + (\Delta b^*)^2]^{1/2}, \quad (5)$$

式中, $\Delta E_{L^*a^*b^*}$  是两个颜色的色差; $\Delta L^*$  表示两个颜色的明度差; $\Delta a^*$ 、 $\Delta b^*$  都表示两个颜色的色度差<sup>[8]</sup>。

近年来各行业一直在探索更好的色差公式用以描述颜色空间真实的色差感觉,如  $DE_{1994}$ 、 $DE_{CMC}$ 、 $DE_{2000}$ <sup>[9]</sup> 色差公式,但这些公式通常是非欧几里得的,不能以简单的距离表示三维空间里的颜色差别。

### 2.2 系数矩阵求解

系数矩阵是矩阵中的众多类型之一,简单来说,系数矩阵就是将方程组的系数组成矩阵,用于计算方程的解。在大量数据的基础上,利用数理统计方法建立因变量  $X$  与自变量  $Y$  之间的回归关系函数表达式,运用矩阵运算可一定限度地减少回归分析中的计算量,简化运算过程,同时有利于运用计算机建立回归方程式。本文作回归分析的目的是通过建立 98 块色板“真实色度值”与“拍摄采集值”之间的相关性,求解回归方程的系数矩阵,通过系数矩阵将任意拍摄的背景色度值校正还原为背景真实颜色,并为配色系统提供准确的颜色信息。为便于在迷彩伪装中开展应用,在构造表达式时将所有数据参数转化为 Lab 形式,如第  $i$  块色板用分光光度计测得的“真实值”为  $L_{oi}$ 、 $a_{oi}$ 、 $b_{oi}$ ,而用拍摄色板得到第  $i$  张图像的“拍摄值”为  $L_{ci}$ 、 $a_{ci}$ 、 $b_{ci}$ ,其中  $i=1,2,3,\dots,n_0$ 。采用线性关系列出方程组,在等式右端添加常数项  $\gamma$ ,修正成像系统在转换过程中带来的增量偏差<sup>[10-13]</sup>,即

$$\begin{cases} L_{oi} = \beta_{01}L_{ci} + \beta_{02}a_{ci} + \beta_{03}b_{ci} + \gamma_{01} \\ a_{oi} = \beta_{11}L_{ci} + \beta_{12}a_{ci} + \beta_{13}b_{ci} + \gamma_{02} \\ b_{oi} = \beta_{21}L_{ci} + \beta_{22}a_{ci} + \beta_{23}b_{ci} + \gamma_{03} \end{cases} \quad (6)$$

记待校正的图像色度值为矩阵  $\mathbf{Y}$ , 色板的真实值为矩阵  $\mathbf{X}$ , 系数矩阵为  $\mathbf{M}$ 。从拍摄图像到真实值的变换可以表示为  $\mathbf{X} = \mathbf{Y}\mathbf{M}^T$ ,  $\mathbf{M}^T$  为  $\mathbf{M}$  矩阵的转置, 这里用到了线性代数中矩阵相乘的运算法则, 设  $\mathbf{Y} = (a_{ij})_{m \times s}$ , 是一个  $m \times s$  的矩阵,  $\mathbf{M}^T = (b_{ij})_{s \times n}$  是一个  $s \times n$  的矩阵, 那么规定矩阵  $\mathbf{Y}$  与矩阵  $\mathbf{M}$  的乘积是一个  $m \times n$  的矩阵  $\mathbf{X} = (c_{ij})_{m \times n}$ 。本研究中  $\mathbf{X}$ 、 $\mathbf{Y}$  和  $\mathbf{M}$  为

$$\mathbf{X} = \begin{bmatrix} L_{o1} & a_{o1} & b_{o1} \\ L_{o2} & a_{o2} & b_{o2} \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ L_{oi} & a_{oi} & b_{oi} \end{bmatrix},$$

$$\mathbf{Y} = \begin{bmatrix} L_{c1} & a_{c1} & b_{c1} & 1 \\ L_{c2} & a_{c2} & b_{c2} & 1 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ L_{ci} & a_{ci} & b_{ci} & 1 \end{bmatrix},$$

$$\mathbf{M} = \begin{bmatrix} \beta_{01} & \beta_{02} & \beta_{03} & \gamma_{01} \\ \beta_{11} & \beta_{12} & \beta_{13} & \gamma_{02} \\ \beta_{21} & \beta_{22} & \beta_{23} & \gamma_{03} \end{bmatrix}.$$

$\mathbf{M}$  可由最小二乘法优化得到,  $\mathbf{M}$  为所求解系数矩阵, 计算公式为

$$\mathbf{M}^T = (\mathbf{X}^T \mathbf{Y})^{-1} \mathbf{X}^T \mathbf{X}. \quad (7)$$

将所求的矩阵  $\mathbf{M}$  代入公式  $\mathbf{X} = \mathbf{Y}\mathbf{M}^T$ , 即可得到改善后图像的  $L^*a^*b^*$  值。该算法的关键之处在于要设计合理的多项式系数<sup>[14-18]</sup>。图 1 是利用系数矩阵进行颜色校正的流程图。

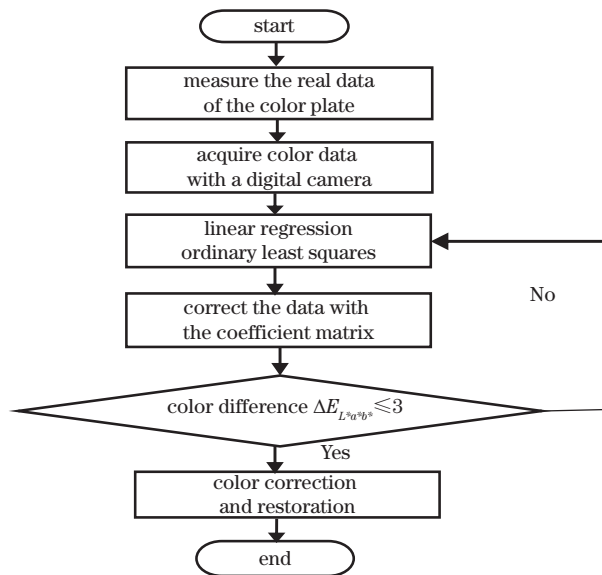


图 1 求解系数矩阵流程图

Fig. 1 Flow chart of coefficient matrix

### 3 结果分析与讨论

#### 3.1 基于真实色度的系数矩阵求解

采用自制的红、黄、蓝单色色浆, 分别将不同质量的黄色颜料、蓝色颜料和红色颜料按照不同比例制作成 98 块标准色板 (黄色颜料分为 15, 20, 25, 30, ..., 75, 80, 85 g; 蓝色颜料分为 85, 80, 75, ..., 30, 25, 20, 15 g; 红色颜料分为 0, 1, 2, 3, ..., 7, 8, 9 g), 并利用岛津 mpc-300 分光光度计, 测试其光谱反射曲线及光谱数据, 测试波段为可见光 (380~760 nm) 波段, 测量光谱间隔为 5 nm, 再利用 Colortell 软件转换成 Lab 值。色板尺寸为 40 cm×40 cm, 测试标准见 GB/T26810-2011。

采集色板及背景颜色前需预先设置数码相机成像设备参数: 白平衡的设定依据光源而定, 光源采用自然光源; 快门速度设为 1/250; 光圈设为 F10。拍摄方法以 45/0 作为拍摄几何条件, 数码相机镜头与色板的平面成 90°, 相机工作距离为 30 cm, 时间为 15:00—16:00。

给定相机拍摄参数, 所有色板用同一相机在同一位置进行拍摄, 采集的图像用 Matlab 软件中的 imtool 函数标定图片的 RGB 值, 用 (2) 式和 (3) 式转换成 XYZ 值, 然后用 (2)~(4) 式将三刺激值 XYZ 转换成均匀色空间 Lab 值。表 1 为部分色板分光光度计测得的“真实色度值”与数码相机的“拍摄采集值”, 表中,  $L_{oi}$ 、 $a_{oi}$ 、 $b_{oi}$  是用光谱仪测量各色板光谱数据后转换成的亮度值和彩度值,  $L_{ci}$ 、 $a_{ci}$ 、 $b_{ci}$  为数码相机采集的图像用 MATLAB 读取其 RGB 并转换得到的亮度值和色度值,  $i=1, 2, 3, \dots, 98$ 。根据 (7) 式, 利用 Matlab 软件处理矩阵, 求得系数矩阵  $\mathbf{M}^T$ , 即

$$\mathbf{M}^T = \begin{bmatrix} 0.0656 & 0.0283 & -0.1235 \\ -0.0707 & 0.4748 & -0.0585 \\ 0.2247 & 0.0604 & 0.5693 \\ 30.0252 & -4.0426 & 5.9722 \end{bmatrix},$$

将所求的矩阵  $\mathbf{M}^T$  代入  $\mathbf{X} = \mathbf{Y}\mathbf{M}^T$  式, 即可改善图像的 Lab 值。

#### 3.2 校正前后图像颜色与真实颜色色差分析

为了避免不同情况下色差计算中的误差, 分别用 CIE DE<sub>1976</sub>, DE<sub>1994</sub>, DE<sub>CMC</sub>, DE<sub>2000</sub> 共 4 种色差公式计算表 1 中 98 块色板真实值与拍摄值之间的色差, 使用 Colortell 绘制校正前后色差趋势曲线, 如图 2 所示。

表 1 部分色板色度值

Table 1 Chromaticity values of partial color plate

No.	$L_{oi}$	$a_{oi}$	$b_{oi}$	$L_{ci}$	$a_{ci}$	$b_{ci}$
1	33.112	-8.073	3.461	29.263	3.074	7.203
2	34.258	-5.591	3.643	37.658	-13.873	-0.489
3	34.271	-3.895	3.473	39.672	-1.419	2.727
4	33.219	-3.107	-3.107	36.842	-1.026	2.904
5	33.837	-2.501	4.038	31.355	-1.445	8.83
6	33.369	-1.436	4.367	32.522	4.053	6.804
7	33.497	-0.628	4.265	30.31	-7.362	16.075
8	32.963	-0.79	4.936	31.778	2.732	6.33
9	32.869	0.297	5.329	32.416	3.609	6.639
10	32.491	0.942	5.578	26.797	12.309	10.437

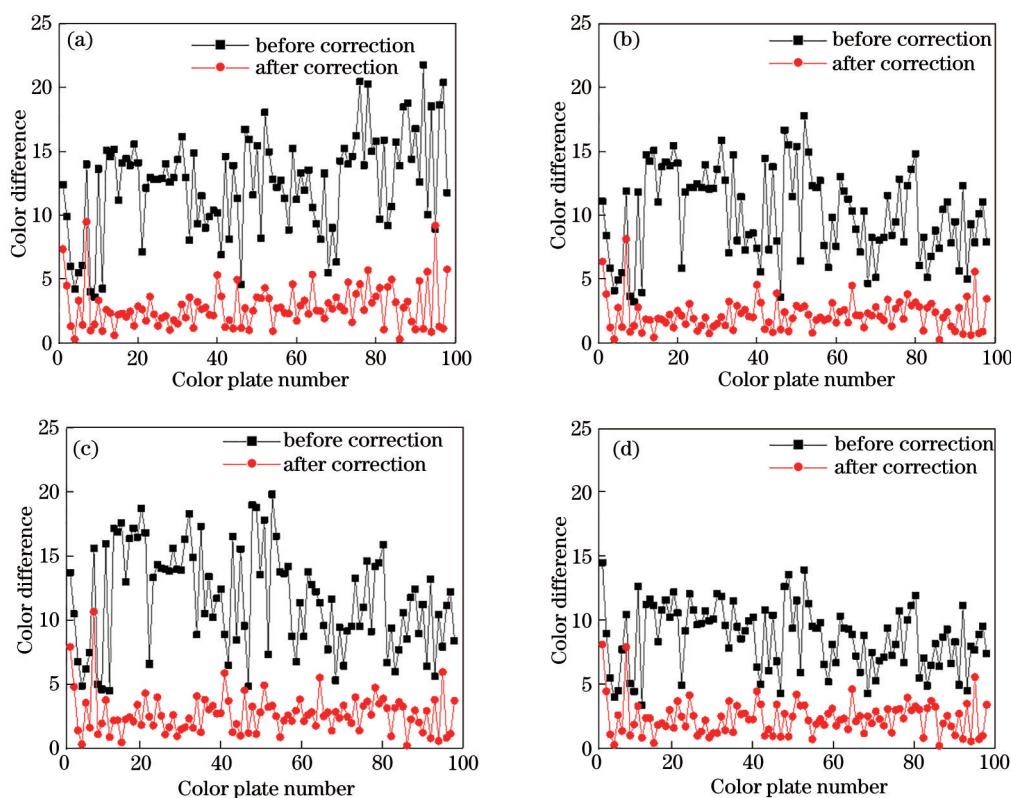


图 2 校正前后利用 4 种色差公式得到的色差散点图对比。(a) CIE DE<sub>1976</sub>; (b) DE<sub>1994</sub>; (c) DE<sub>CMC</sub>; (d) DE<sub>2000</sub>

Fig. 2 Scatter diagrams of chromatic aberration obtained by four chromatic aberration formulas before and after correction.

(a) CIE DE<sub>1976</sub>; (b) DE<sub>1994</sub>; (c) DE<sub>CMC</sub>; (d) DE<sub>2000</sub>

从图 2 中可以看出, 4 种色差公式计算得到的色差散点图一致, 即用相机拍摄的图片颜色失真比较严重, 4 种色差  $\Delta E_{L^*a^*b^*}$  均远超过了 3, 合格率全部为 0。用校正矩阵选择 98 块色板中的数据(为了具有对比性, 这里选用表 1 中的数据进行处理), 经回归分析可知, 用系数矩阵校正的结果极大地改善了拍摄值, 其平均色差符合伪装技术  $\Delta E_{L^*a^*b^*} \leq 3$  的色差要求, 但最大色差中依然有部分超过了阈值, 其原

因是在测量过程中光照等因素变化引起较大误差, 系数矩阵在校正之后虽然减小了误差, 但仍然不满足要求, 优化方法是可以将这些数据继续使用该矩阵进行校正, 直到符合条件为止。

### 3.3 运用系数矩阵校正背景颜色

在同等拍摄条件下拍摄另外一组背景图片, 测出背景中 8 种主要颜色的真实值和拍摄值, 表 2 和图 3 列出数据表和颜色对比图, 并进行实验验证。

表 2 相同拍摄条件下的色板数据对比

Table 2 Comparison of swatch data under the same shooting conditions

No.	Real value			Shooting value			Value after correction		
	<i>L</i>	<i>a</i>	<i>b</i>	<i>L</i>	<i>a</i>	<i>b</i>	<i>L</i>	<i>a</i>	<i>b</i>
1	44.446	-5.906	27.879	45.451	-8.176	40.210	42.620	-4.210	23.729
2	44.450	-4.068	27.310	52.860	-7.336	47.134	44.603	-3.183	26.707
3	43.884	-1.727	25.135	45.751	-2.421	34.953	41.052	-1.786	20.362
4	43.703	-1.284	25.905	47.758	-2.932	43.890	47.758	-1.432	25.232
5	43.620	0.455	24.319	51.076	2.120	28.925	39.725	0.357	23.007
6	42.906	1.864	25.079	48.617	4.636	42.568	42.452	2.106	23.931
7	42.335	2.566	24.591	48.366	3.489	44.023	42.843	1.642	24.857
8	42.583	3.242	23.695	48.817	5.956	33.273	40.283	2.177	18.537



图 3 背景颜色校正前后对比

Fig. 3 Background color correction before and after comparison

图 3 中,第一行图片是拍摄值的颜色显示,中间是真实值的颜色显示,第三行是拍摄值校正后的颜色显示。无论从色差数据还是直观显示上,都可以看出拍摄值和真实值之间是有明显色差的,而经过校正后拍摄值与真实值之间的色差不明显,大部分数据的色差满足  $\Delta E_{L^*a^*b^*} \leq 3$ ,这也说明了该方法的有效性。

表 3 给出校正前后的平均色差对比,从平均色差的数据来看,系数矩阵的校正效果很好,  $DE_{1976}$  公式计算得到的色差值比后面三个色差公式得到的

表 3 校正前后平均色差数据的对比

Table 3 Comparison of average chromatic aberration data before and after correction

Color classification	Average color before correction	Average color after correction
$DE_{1976}$	15.316	3.298
$DE_{1994}$	8.624	2.272
$DE_{CMC}$	9.465	2.495
$DE_{2000}$	7.799	2.292

值大,这与公式适用的视觉尺度和部分数据的偏差相关,  $CIE DE_{2000}$  公式包含了对  $CIE DE_{1976}$  明度、彩度、色相、彩度差和色相差 5 个方面的校正,故相比  $DE_{1976}$  在精度方面有很大的提升。

## 4 结 论

受光照等不同条件的影响,数码相机等图像采集设备在拍照时会出现偏色问题。针对这一问题,本研究采用基于系数校正矩阵的回归算法,将图像颜色信息与分光光度计测得的真实值进行对比分析,选取了 4 类色差公式对不同的色板进行平均色差的计算。由处理结果可知,采用该系数矩阵校正后,平均色差  $\Delta E_{L^*a^*b^*} \leq 3$ ,满足迷彩伪装中关于色差的要求,达到了良好的校正效果,对于今后伪装技术中颜色校正的研究具有一定的参考价值。但需要注意的是校正的图像最好是在同种光源条件下拍摄的图像,而本文在拍摄色板图像时(15:00—16

:00)存在光照变化,这可能会导致部分实验数据色差过大。在下一阶段的实验中可以尝试采用固定光源,选取一款性能较好的拍摄设备或者直接使用色度计提取颜色信息后进行实验,以便进一步减少数据的误差。

### 参 考 文 献

- [1] Rizzi A, Gatta C, Marini D. A new algorithm for unsupervised global and local color correction[J]. *Pattern Recognition Letters*, 2003, 24(11): 1663-1677.
- [2] Levit S L, Nguyen J, Hattrup N P, et al. Color space transformation-based algorithm for evaluation of thermochromic behavior of cholesteric liquid crystals using polarized light microscopy[J]. *ACS Omega*, 2020, 5(13): 7149-7157.
- [3] Arul S M. Approximation algorithms for the achromatic number of butterfly and Beneš networks [J]. *Procedia Computer Science*, 2020, 172: 723-728.
- [4] Yuan T, Han Z H, Li L, et al. Tunable-liquid-crystal-filter-based low-light-level color night vision system and its image processing method[J]. *Applied Optics*, 2019, 58(18): 4947-4955.
- [5] Chen X W, Zheng H, Cai J Y, et al. Four-band image color cast correction algorithms based on optimized polynomial regression[J]. *Computer Systems & Applications*, 2020, 29(3): 223-227.  
陈晓文, 郑华, 蔡坚勇, 等. 优化多项式回归的四带图像偏色校正算法[J]. *计算机系统应用*, 2020, 29(3): 223-227.
- [6] Lin Y, Fan C Y. Fast video feature registration based on feature prediction and neighborhood consistency[J]. *Computer Engineering*, 2019, 45(12): 267-273.  
林洋, 樊春运. 基于特征预测与邻域一致性的视频特征快速配准[J]. *计算机工程*, 2019, 45(12): 267-273.
- [7] Hu W J, Tang S Q, Zhu Z F. *Modern color science and application*[M]. Beijing: Beijing Insitute of Technology Press, 2007.  
胡威捷, 汤顺青, 朱正芳. *现代颜色技术原理及应用*[M]. 北京: 北京理工大学出版社, 2007.
- [8] Yu H Q, Liu Z, Tian Q H. Spectral characterization of color scanners based on principal component analysis [J]. *Imaging Science and Photochemistry*, 2015, 33(2): 161-167.  
于海琦, 刘真, 田全慧. 基于主成分分析的彩色扫描仪光谱特性化[J]. *影像科学与光化学*, 2015, 33(2): 161-167.
- [9] Huang M, Liao N F, Xu Y F. Analysis of color difference formulae with the Chinese color system[J]. *Optical Technique*, 2007, 33(S1): 46-48.  
黄敏, 廖宁放, 徐艳芳. 基于中国颜色体系的色差公式分析[J]. *光学技术*, 2007, 33(S1): 46-48.
- [10] Yan M. Research on application of polynomial regression analysis for computer color matching in textile dyeing[D]. Qingdao: Qingdao University, 2015.  
闫敏. 多项式回归分析在织物染色计算机配色中的应用研究[D]. 青岛: 青岛大学, 2015.
- [11] 송인호, 권혁주, 김태규, et al. 3D image representation using color correction matrix according to the CCT of a display[J]. *Journal of Korea Multimedia Society*, 2019, 22(1): 55-61.
- [12] Matsuoka R, Shirai K, Okuda M. Reference-based local color distribution transformation method and its application to image integration[J]. *Signal Processing: Image Communication*, 2019, 76: 231-242.
- [13] Zhou Q, Liu Z, Zhu M. Errors analysis of three major color separation algorithms[J]. *Packaging Engineering*, 2011, 32(7): 107-111.  
周倩, 刘真, 朱明. 3种主流分色算法的误差分析[J]. *包装工程*, 2011, 32(7): 107-111.
- [14] Zeng Z B, Zheng H, Cai J Y, et al. Color correction algorithm for four-band image based on polynomial regression[J]. *Computer Systems & Applications*, 2018, 27(4): 209-214.  
曾兆滨, 郑华, 蔡坚勇, 等. 基于多项式回归的四带图像偏色校正算法[J]. *计算机系统应用*, 2018, 27(4): 209-214.
- [15] Ran Q, Zhao W J, Feng J Q. Intrinsic color correction for stereo matching[J]. *Computers & Graphics*, 2019, 82: 22-31.
- [16] Kim E S. Color correction method of non-standard display using standard color space[J]. *Journal of the Korea Academia-Industrial Cooperation Society*, 2015, 16(3): 2151-2157.
- [17] Li C Y, Guo J C. Underwater image enhancement by dehazing and color correction[J]. *Journal of Electronic Imaging*, 2015, 24(3): 033023.
- [18] Finlayson G D, Mackiewicz M, Hurlbert A. Color correction using root-polynomial regression[J]. *IEEE Transactions on Image Processing*, 2015, 24(5): 1460-1470.