

# 基于均匀空间的颜色分级方法

钟克洪 丁明跃 周成平 周亚安

(华中科技大学图像识别与人工智能研究所, 图像信息处理与智能控制教育部重点实验室, 武汉 430074)

**摘要** 自动视觉检测是机器视觉的一个重要研究领域, 而颜色分级是自动视觉检测中的一个典型问题, 在陶瓷、木材等行业应用广泛。为了实现快速自动分级, 根据人类视觉特性, 提出了一种基于均匀颜色空间的表面颜色分级方法。该方法首先将数据从 RGB 颜色空间转换到 CIE 1976 L\*a\*b\* 均匀颜色空间; 然后在 CIE 1976 L\*a\*b\* 空间用 RWM (radius weighted mean) 方法提取主导颜色 (dominant colors, DC), 再以此作为颜色特征, 提出了一种新的颜色距离度量——映射色差, 并分析了它与平均色差的关系; 最后以映射色差为距离度量, 采用最小距离分类器来进行颜色分级。实验结果说明该方法是有效的。

**关键词** 机器视觉 自动视觉检测 颜色分级 彩色图像 主导颜色

**中图分类号:** TP391.41 **文献标识码:** A **文章编号:** 1006-8961(2004)11-1277-07

## Color Grading Method Based on Perceptually Uniform Color Space

ZHONG Ke-hong, DING Ming-yue, ZHOU Cheng-ping, ZHOU Ya-an

(Institute for Pattern Recognition and Artificial Intelligence State Education Department Key Laboratory for Image Processing and Intelligent Control Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074)

**Abstract** Automatic visual inspection is one of the most important areas of machine vision. Color grading is one of the typical issues in automatic visual inspection, and has been broadly used in ceramic tiles, lumber etc. In order to implement grading quickly, accurately and automatically, a color grading method based on perceptually uniform color space is put forward according to human vision system characteristics. Firstly, color data in RGB like color space is transformed into perceptually uniform color space—CIE 1976 L\*a\*b\*. In CIE 1976 L\*a\*b\* color space, 2-D RWM (radius weighted mean) cut algorithms are applied to extract DC (dominant colors), which is not sensitive to lighting change and less computation complexity compared to 3-D RWM cut algorithms. Then, DC set as color feature, an innovative color distance metric—mapping color difference is proposed, which is identical to human visual system characteristic. The relation between mapping color difference and average color difference is also analysed. Finally, mapping color difference used as distance metric, anaminimum distance classifier is adopted to color grading. Experiments results show that the proposed method is effective and encouraging.

**Keywords** machine vision, automated visual inspection, color grading, color image, dominant colors (DC)

## 1 引言

视觉检测在产品质量控制中的作用日益重要<sup>[1,2]</sup>, 但现阶段最常使用的仍然是人工检测, 由于受人的个体差异和生理、心理状态等限制, 因此检测精度、一致性难以得到保证。随着机器视觉及相关技术的发展, 自动视觉检测技术愈来愈成为现代工业

生产过程进行质量控制的必选配置。

如今自动视觉检测 (automated visual inspection) 是机器视觉的一个重要研究领域, 而表面颜色分级是自动视觉检测中的一个典型问题, 其在陶瓷、木材等行业应用较为广泛<sup>[3-10]</sup>。表面颜色分级是指根据人类视觉特性将颜色相同或相近的物体分为同一等级的过程, 由于其具有很强的主观特性, 因此必须兼顾人类的视觉特性。本文旨在研究瓷

砖表面颜色的分级问题。

文献[3]讨论了照明的空间和时间变化,并以 R,G,B 三均值作为颜色特征分析了单色瓷砖颜色分级的可行性。文献[4]对纹理瓷砖进行了颜色分级研究,其在 RGB 空间,用 K-均值聚类方法进行图像分割来将纹理瓷砖的颜色分级问题转化为单色砖的颜色分级问题。文献[5]提出了一种基于二叉树的纹理瓷砖的表面颜色分级方法,即采用二叉树在 RGB 颜色空间表示和计算颜色三维直方图,并根据颜色三维直方图相关系数对瓷砖进行等级分类。鉴于 RGB 颜色空间两颜色间的 Euclidean 距离和色差不存在单调关系,因而文献[3~5]方法存在局限性。文献[6,7]将文献[5]的方法拓展到 CIE 1976 L\*a\*b\* 均匀颜色空间,但仅基于颜色直方图的特征集不足以充分表征人类视觉系统对图像颜色的感知特性。文献[8]采用多光谱图像,并用 SOM 神经网络进行多光谱数据分析。

本文提出了一种基于均匀颜色空间的表面颜色分级方法。该方法首先将瓷砖表面颜色数据从 RGB 颜色空间转换到 CIE 1976 L\*a\*b\* 均匀颜色空间;然后在该空间用加权均值(radius weighted mean, RWM)切分方法提取主导颜色(dominant colors, DC),并将其作为颜色特征;最后以映射色差为距离度量,用最小距离分类器进行颜色分级。

### 2 颜色空间选择

在 MCVS(machine color vision system)应用中,由于颜色表示方法即颜色空间繁多,并且没有哪种颜色空间占主导地位,因而必须根据具体应用选择合适的颜色空间。彩色 CCD(charge coupled device)相机的输出数据通常为类 RGB(RGB-like)数据,它可直接用于类 RGB 颜色空间表示。类 RGB 颜色空间有如下两个主要缺陷:其一,对于相同入射光,不同彩色 CCD 相机可能产生不同的类 RGB 输出值;其二,在该空间,由于两颜色间的 Euclidean 距离和色差不存在单调关系,因而用 Euclidean 距离度量色差可能存在很大误差。MCVS 设计的一个重要步骤即确定类 RGB 设备相关颜色空间和设备无关颜色空间的关系。本文首先将 CCD 相机输出的类 RGB 数据转换到 CIE 1931 XYZ 颜色空间。由于 CIE 1931 XYZ 颜色空间与设备无关,并且同其他设备无关的颜色空间之间存在映射关系(如图 1 所

示),于是类 RGB 颜色空间到 CIE 1931 XYZ 颜色空间转换关系可近似为

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_{1,1} & a_{1,2} & a_{1,3} \\ a_{2,1} & a_{2,2} & a_{2,3} \\ a_{3,1} & a_{3,2} & a_{3,3} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} R \\ G \\ B \end{bmatrix} \quad (1)$$

其中,  $a_{i,j}$  与成像硬件系统的色度学特性相关。

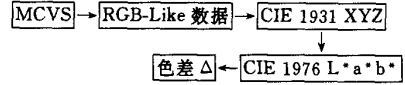


图 1 颜色空间相互关系

CIE 1976 L\*a\*b\* 颜色空间是 CIE 1931 XYZ 颜色空间的一种非线性映射,而且该颜色空间为均匀颜色空间,即该空间两颜色的 Euclidean 距离和色差近似相等,其两颜色空间之间的转换关系为<sup>[11,12]</sup>

$$\begin{cases} L^* = 116f\left(\frac{Y}{Y_0}\right) - 16 \\ a^* = 500\left[f\left(\frac{X}{X_0}\right) - f\left(\frac{Y}{Y_0}\right)\right] \\ b^* = 200\left[f\left(\frac{Y}{Y_0}\right) - f\left(\frac{Z}{Z_0}\right)\right] \end{cases} \quad (2)$$
  
$$f(q) = \begin{cases} q^{\frac{1}{3}} & q > 0.008856 \\ 7.787q + \frac{16}{116} & q \leq 0.008856 \end{cases}, q = \frac{X}{X_0}, \frac{Y}{Y_0}, \frac{Z}{Z_0} \quad (3)$$

其中,  $L^* \in [0, 100]$ ;  $a^* \in [-100, 100]$ ;  $b^* \in [-100, 100]$ ;  $(X_0, Y_0, Z_0)$  为参考白点,用以表征观测条件,其主要与照明相关。一般称  $L^*$  为明度指数,称  $a^*$  和  $b^*$  为色品指数。在 CIE 1976 L\*a\*b\* 颜色空间,  $(L_1^*, a_1^*, b_1^*)$  和  $(L_2^*, a_2^*, b_2^*)$  两颜色之间色差表示为

$$\Delta = \sqrt{(L_1^* - L_2^*)^2 + (a_1^* - a_2^*)^2 + (b_1^* - b_2^*)^2} \quad (4)$$

可用  $\Delta$  近似表征人眼视觉感知到的两颜色之间的差异程度。据研究,人类视觉通常无法察觉小于 3 个  $\Delta$  单位的颜色差异。

### 3 颜色特征提取

颜色特征提取旨在获得图像颜色视觉相关的紧凑表示。据笔者所知,尽管基于图像直方图的颜色特征在彩色图像处理中获得了广泛的应用,然而仅基于颜色直方图的特征集不足以充分表征人类视觉系

统对图像颜色的感知特性。研究表明,由于人类视觉系统可通过 DC 来识别和理解整个颜色表面,因而从全局来看,可通过几个重要的 DC 来感知物体表面颜色<sup>[13]</sup>。一般来说,实际工业产品表面的 DC 数目是很少的,但由于受传感器性能和噪声影响,致使从 MCVS 中获取的 DC 数目往往非常多,因而本文用 RWM 切分方法<sup>[14,15]</sup>来获得图像的 DC 集,并以此作为颜色特征。

### 3.1 RWM 切分算法

定义有限二维点集  $S = \{(x_i, y_i)\}_{i \in S}$  的重心坐标  $(\bar{x}, \bar{y})$  和 RWM 坐标  $(\hat{x}, \hat{y})$  分别为

$$(\bar{x}, \bar{y}) = \left( \frac{1}{|S|} \sum_{i=1}^{|S|} x_i, \frac{1}{|S|} \sum_{i=1}^{|S|} y_i \right) \quad (5)$$

$$(\hat{x}, \hat{y}) = \left( \frac{\sum_i w_i x_i}{\sum_i w_i}, \frac{\sum_i w_i y_i}{\sum_i w_i} \right) \quad (6)$$

其中,  $|\cdot|$  为集合的势;  $w_i = \sqrt{(x_i - \bar{x})^2 + (y_i - \bar{y})^2}$ ;  $(\hat{x}, \hat{y})$  为  $S$  的 RWM 坐标,且权值大小与到点集重心的 Euclidean 距离成正比。在点集聚类中,可以把分布比较密集的点分为一类,而把与密集点距离较远的点分为另一类。由于点集的重心坐标偏向点密集区域,而 RWM 坐标偏向于点稀疏区域,据此可进行点集空间切分。切分直线的构造方法为:连接有限点集的重心坐标  $(\bar{x}, \bar{y})$  和 RWM 坐标  $(\hat{x}, \hat{y})$  构成直线  $l$ ,切分直线  $\hat{l}$  过 RWM 坐标  $(\hat{x}, \hat{y})$ ,且垂直于  $l$ ,用直线方程表示为

$$\hat{l}: y = k(x - \hat{x}) + \hat{y} \quad (7)$$

其中,  $k = -(\hat{x} - \bar{x}) / (\hat{y} - \bar{y})$ 。通过  $\hat{l}$  可将有限点集切分为  $S = S_1 \cup S_2$ ,且  $S_1, S_2 \neq \emptyset, S_1 \cap S_2 = \emptyset$ 。若期望的点集子集数  $K > 2$ ,可对方差最大的子集进行切分,直至得到期望子集数为止。点集  $A$  的方差计算式为

$$\sigma_A = \frac{1}{|A|} \sum_{(x_i, y_i) \in A} \|(x_i, y_i) - O_A\|^2 \quad (8)$$

其中,  $O_A$  为点集  $A$  的重心坐标;  $\|\cdot\|$  为  $L_2$  范数。RWM 切分算法可推广到有限高维点集。

### 3.2 颜色特征提取

本文用二维 RWM 切分法对 CIE 1976 L\*a\*b\* 三维空间的 a\*-b\* 平面进行切分,而切分后的各三维像素子集的重心和势(面积)则构成颜色特征向量。采用二维切分方法基于如下理由:(1)明度指数  $L^*$  和色品指数  $a^*, b^*$  相互独立,并且  $a^*, b^*$  具有光照不变性,在 a\*-b\* 平面用二维 RWM 切分方法较

用三维 RWM 切分方法具有相当,甚至更好的量化效果,并且可在一定程度上克服光照不均匀性影响;(2)二维 RWM 切分方法较三维 RWM 切分方法计算复杂度大为减小。

设图像像素三维点集  $S = \{(L_i^*, a_i^*, b_i^*) | i = 1, 2, \dots, |S|\}$ ,其对应的二维 a\*-b\* 点集为  $\hat{S} = \{(a_i^*, b_i^*) | i = 1, 2, \dots, |S|\}$ ,DC 数设定为  $K$ ,基于二维 RWM 切分方法的颜色特征提取方法步骤如下:

- (1) 初始像素子集  $\hat{S}_i$  为像素点集  $\hat{S}$ ,转到步骤(3);
- (2) 选择方差最大的子集  $\hat{S}_i$  进一步切分;
- (3) 计算  $\hat{S}_i$  的重心坐标  $(\bar{a}^*, \bar{b}^*)$  和 RWM 坐标  $(\hat{a}^*, \hat{b}^*)$ ;
- (4) 根据式(7)构造直线  $\hat{l}$ ,将子集  $\hat{S}_i$  划分为两个子集;
- (5) 重复步骤(2)到步骤(4),直到子集数达到  $K$  为止;
- (6) 计算每个子集的重心坐标  $(\bar{L}^*, \bar{a}^*, \bar{b}^*)$  和势  $p$ ,并用其构成颜色特征向量  $V = [v_1^T, v_2^T, \dots, v_k^T]^T$ ,其中  $v_i = [c^T, p_i]^T = [\bar{L}_i^*, \bar{a}_i^*, \bar{b}_i^*, p_i]^T$ 。

## 4 颜色分级方法

### 4.1 映射色差

根据人类视觉感知特性,若要两幅图像的颜色构成相同,则必须满足以下两个条件:(1)DC 集必须相同;(2)与每种 DC 对应的面积必须相同。对于工业产品表面图像,颜色差异主要体现在各对应 DC 重心的微小差异上,其主要原因在于:(1)原材料存在差异性;(2)工艺过程的变化性。由于与工业产品表面各 DC 对应的面积可认为近似相等,并可由产品外观设计方案决定,因此两幅图像的颜色差异可用本文提出的映射色差来度量。

设两幅图像  $A$  和  $B$ ,其 DC 集分别为  $\{C_A | U_A^{(1)}, U_A^{(2)}, \dots, U_A^{(K)}\}$  和  $\{C_B | U_B^{(1)}, U_B^{(2)}, \dots, U_B^{(K)}\}$ ,令  $I(U_x^{(i)}) (x = A, B, i = 1, 2, \dots, K)$  表示与  $U_x^{(i)}$  对应的颜色值,令图像  $A$  的 DC 集和图像  $B$  的 DC 集之间的双射集为  $\{M_{A,B} | m_{A,B}: C_A \rightarrow C_B\}$ ,则每个双射可定义一个映射距离

$$d_m(C_A, C_B) = \sum_{i=1}^K d\{I(U_A^{(i)}), I[m_{A,B}(U_A^{(i)})]\} \quad (9)$$

其中,  $d(\cdot)$  为两 DC 集对应颜色之间的 Euclidean 距离,其最小映射距离定义为

$$d_{\min}^{(m)} = \min_{m_{A,B}} d_m(C_A, C_B) \quad (10)$$

可见该优化问题为一最小代价图匹配问题,其算法复杂度为  $O(n^3)^{[16,17]}$ 。

鉴于工业产品表面图像如下特性:同一表面不同 DC 重心值之间的差异较大,而不同表面的对应 DC 重心之间的差异较小,因而可用序贯方法求取双射,使其映射距离最小。设图像  $A$  和  $B$  的 DC 集分别为  $C_A$  和  $C_B$ ,据其则可产生无向二分图  $G_{A,B}$ (如图 2 所示)。 $G_{A,B}$  包含  $2n$  个结点(分别对应 DC 集  $C_A$  和  $C_B$ )和  $n^2$  条边,每条边对应  $C_A$  中一个结点和  $C_B$  中一个结点,每条边的代价为两 DC 重心之间的 Euclidean 距离。 $G_{A,B}$  的最小代价图匹配解提供了两幅图像的 DC 集之间的一个双射  $\hat{m}_{A,B}$ 。序贯法步骤如下:

(1) 搜索  $G_{A,B}$  中代价最小的边,并保留该边,然后删除与代价最小边两结点相连的所有其他边,以更新  $G_{A,B}$ ;

(2) 重复步骤(1)直到搜索到  $n$  条边为止,其就构成  $C_A$  和  $C_B$  之间的双射  $\{\hat{m}_{A,B}\}$ 。

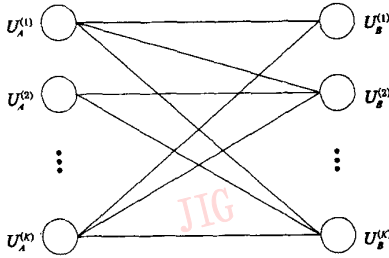


图 2 二分图示意图

由颜色特征向量  $V_A, V_B$  和双射  $\{\hat{m}_{A,B}\}$  可定义映射色差为

$$e = \sqrt{\sum_{i=1}^K \frac{[p_A^{(i)} + \hat{m}_{A,B}(p_A^{(i)})]}{\sum_{i=1}^K p_A^{(i)} + \sum_{i=1}^K \hat{m}_{A,B}(p_A^{(i)})} d^2\{c_A^{(i)}, \hat{m}_{A,B}(c_A^{(i)})\}} \quad (11)$$

其中,  $p_A^{(i)}$  和  $c_A^{(i)}$  分别为图像  $A$  第  $i$  个像素子集的势和重心;  $\hat{m}_{A,B}(p_A^{(i)})$  和  $\hat{m}_{A,B}(c_A^{(i)})$  分别为图像  $A$  第  $i$  个像素子集在图像  $B$  中的像的势和重心;  $K$  为 DC 数目;  $d(\cdot)$  为 Euclidean 距离。

### 4.2 映射色差和平均色差关系

定义有限颜色点集  $C = \{(L_i^*, a_i^*, b_i^*)\}_{i=1}^{|C|}$  和  $\hat{C} = \{(\hat{L}_i^*, \hat{a}_i^*, \hat{b}_i^*)\}_{i=1}^{|C|}$ , 并且  $|C| = |\hat{C}|$ ,  $C$  和  $\hat{C}$  之间存在双射关系  $\{m_{C,\hat{C}}: (L_i^*, a_i^*, b_i^*) \rightarrow (\hat{L}_i^*, \hat{a}_i^*, \hat{b}_i^*), i=1, 2, \dots, |C|\}$ , 则  $C$  和  $\hat{C}$  的平均色差为<sup>[11,12]</sup>

$$\bar{\Delta} = \sqrt{\frac{1}{|C|} \sum_{i=1}^{|C|} [(L_i^* - \hat{L}_i^*)^2 + (a_i^* - \hat{a}_i^*)^2 + (b_i^* - \hat{b}_i^*)^2]} \quad (12)$$

若  $C = \bigcup_{i=1}^K C_i$ , 且  $C_i \neq \emptyset, C_i \cap C_j = \emptyset, i, j=1, 2, \dots, K, i \neq j, C_i$  对应一个 DC 子集。 $\hat{C}$  有相同划分, 并且双射关系不变, 则

$$\bar{\Delta} = \sqrt{\frac{1}{|C|} \sum_{i=1}^K \sum_{j=1}^{|C_i|} [(L_{i,j}^* - \hat{L}_{i,j}^*)^2 + (a_{i,j}^* - \hat{a}_{i,j}^*)^2 + (b_{i,j}^* - \hat{b}_{i,j}^*)^2]} \quad (13)$$

假定双射颜色子集  $C_i$  和  $\hat{C}_i$  的颜色分量  $L^*$  的变化方向一致, 即存在

$$\begin{aligned} L_{i,j}^* &\geq \hat{L}_{i,j}^*, \forall j, \quad j=1, 2, \dots, |C_i| \text{ 或} \\ L_{i,j}^* &\leq \hat{L}_{i,j}^*, \forall j, \quad j=1, 2, \dots, |C_i| \end{aligned} \quad (14)$$

则有

$$\begin{aligned} \sum_{j=1}^{|C_i|} (L_{i,j}^* - \hat{L}_{i,j}^*)^2 &\leq \left[ \sum_{j=1}^{|C_i|} (L_{i,j}^* - \hat{L}_{i,j}^*) \right]^2 \\ &= \left( \sum_{j=1}^{|C_i|} L_{i,j}^* - \sum_{j=1}^{|C_i|} \hat{L}_{i,j}^* \right)^2 \\ &= [ |C_i| (\bar{L}_i^* - \bar{\hat{L}}_i^*) ]^2 \end{aligned} \quad (15)$$

同理

$$\sum_{j=1}^{|C_i|} (a_{i,j}^* - \hat{a}_{i,j}^*)^2 \leq [ |C_i| (\bar{a}_i^* - \bar{\hat{a}}_i^*) ]^2 \quad (16)$$

$$\sum_{j=1}^{|C_i|} (b_{i,j}^* - \hat{b}_{i,j}^*)^2 \leq [ |C_i| (\bar{b}_i^* - \bar{\hat{b}}_i^*) ]^2 \quad (17)$$

把式(15), 式(16)和式(17)代入到式(13)得

$$\begin{aligned} \bar{\Delta} &\leq \sqrt{\sum_{i=1}^K \frac{|C_i|}{|C|} [(\bar{L}_i^* - \bar{\hat{L}}_i^*)^2 + (\bar{a}_i^* - \bar{\hat{a}}_i^*)^2 + (\bar{b}_i^* - \bar{\hat{b}}_i^*)^2]} \\ &= \sqrt{\sum_{i=1}^K \frac{|C_i|}{|C|} d^2(c_i, \hat{c}_i)} \end{aligned} \quad (18)$$

其中,  $c_i = [\bar{L}_i^*, \bar{a}_i^*, \bar{b}_i^*]^T; \hat{c}_i = [\bar{\hat{L}}_i^*, \bar{\hat{a}}_i^*, \bar{\hat{b}}_i^*]^T$ 。

对比式(11)和式(18)可知: 在式(14)条件下, 映射色差小于平均色差。由式(11)可见, 式(11)允许图像  $A$  和图像  $B$  及其映射像素子集的势存在微小差异。

### 4.3 基于均匀空间的颜色分级方法

在表面颜色分级中, 分类器设计至少存在以下两个方面的难点: 其一是类别数和类别的先验知识未知; 其二无法预先获得学习样本。本文采用最小距离分类器, 而距离度量则采用映射色差, 其分级过程如下:

(1) 将第 1 个产品设定为第 1 个级别的学习样本,并提取和存储其颜色特征向量;

(2) 计算当前产品的颜色特征向量,同时计算其同各级别样本之间的映射色差,并确定各映射色差最小值  $e_{min}$ ;

(3) 若  $e_{min} \leq T$  ( $T$  为色差阈值),则当前产品属于与  $e_{min}$  对应的级别,否则将产生一个新的级别,并将当前产品设定为该级别的学习样本;

(4) 重复步骤(2)和步骤(3),直到各产品分级完毕。

其中阈值  $T$  可根据厂家对色差的要求进行整定。

### 5 实验设计与分析

为验证本文方法的有效性,进行了两组实验。实验用的成像系统由北京凌云光视数字图像技术有限公司设计和安装,具体配置包括:光纤光源;Dalsa 彩色线阵 CCD 相机;Coreco viper digital 图像采集卡;Omron 旋转编码器。另外,整个机械传动和控制装置由佛山康思达液压机械有限公司设计、制造和安装。实验共采用两组样本,均为已由人工分好类别的瓷砖(如图版 I 图 1 所示),每组包括 3 个类别(在陶瓷行业中称为“色号”),每个类别包括 6 块瓷砖,共计 18 块,实验中用人工检测采用的模板瓷砖作为学习样本。

CCD 相机输出的 RGB 数据到 CIE XYZ 空间的转换矩阵为

$$\begin{bmatrix} 0.4303 & 0.3416 & 0.1784 \\ 0.2219 & 0.7068 & 0.0713 \\ 0.0202 & 0.1296 & 0.9393 \end{bmatrix} \quad (19)$$

必须指出的是,转换过程中 RGB 数据要规范化到  $[0,100]$ 。由 CIE XYZ 空间转换到 CIE 1976  $L^*a^*b^*$  空间的参考白点为

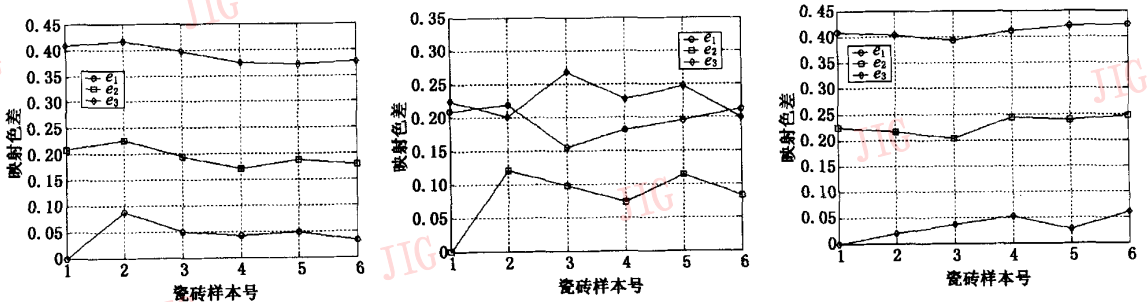
$$[X_0, Y_0, Z_0] = [95.05, 100, 108.88] \quad (20)$$

它为完全漫反射体在标准照明体 D65 下的三刺激值。

实验 1 的样本图像如图版 I 图 1(a)所示,实验中将 DC 数目设定为 1,实验结果如图 3 所示,其中图 3(a)为色号 1 的瓷砖到 3 个色号的模板瓷砖的映射色差折线图,纵坐标为映射色差,横坐标为瓷砖样本序号,第 1 块对应色号 1 的模板瓷砖,  $e_1, e_2, e_3$  分别对应各瓷砖样本到色号 1、色号 2、色号 3 模板瓷砖的映射色差。从图中可以看出,各色号瓷砖样本到本色号模板瓷砖的映射色差一般都小于 0.1,而到不同色号模板瓷砖的映射色差一般都大于 0.15。

实验 2 的图像样本如图版 I 图 1(b)所示,实验中将 DC 数目设定为 2,实验结果如图 4 所示。从图中可以看出,各色号瓷砖样本到本色号模板瓷砖的映射色差一般都小于 0.2,而到不同色号模板瓷砖的映射色差一般都大于 0.3。根据实验 1 和实验 2 的结果可以看出,基于映射色差的表面颜色检测方法是有效的,且和人的视觉感知特性有很好的一致性。

就实验过程和结果必须说明几点:(1)在颜色特征向量的提取过程中,DC 数目的选择对分级结果有很大影响,DC 数目的多少可由产品外观设计方案确定;(2)限于实验条件,文中实验主要是验证方法的有效性,实际应用中,分级过程可依据 3.2 节介绍的方法进行,色号样本在检测过程中动态产生;(3)在颜色分级中,映射色差阈值可根据厂家对色差的要求进行整定。



(a) 色号 1 瓷砖到模板瓷砖的映射色差曲线 (b) 色号 2 瓷砖到模板瓷砖的映射色差曲线 (c) 色号 3 瓷砖到模板瓷砖的映射色差曲线

图 3 单色瓷砖分级结果

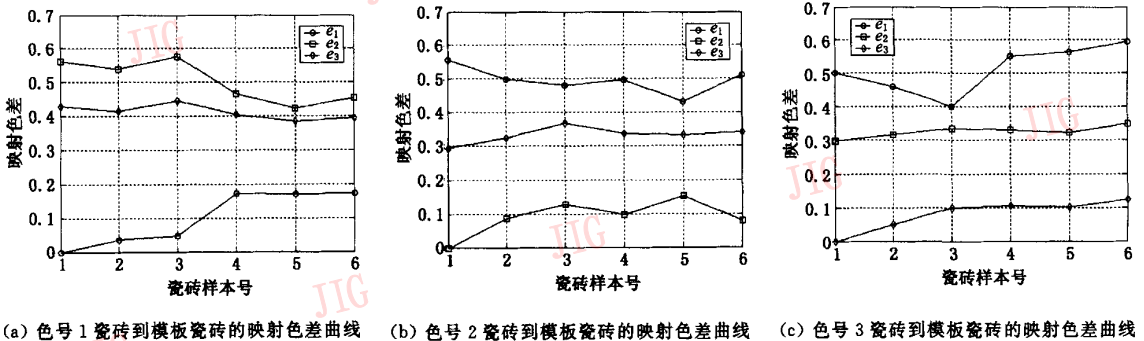


图4 纹理瓷砖分级结果

## 6 结论

颜色分级是工业产品表面质量检测中一个典型问题,在陶瓷、木材等行业应用广泛。本文提出了一种新的颜色距离度量指标——映射色差,并分析了它同平均色差的关系,该距离度量指标可很好表征工业产品表面颜色差异。本文还提出了一种基于均匀颜色空间的表面颜色分级方法,而且其检测结果和人的视觉感知特性有很好的 consistency。本文提出的映射色差颜色距离度量和基于均匀颜色空间的表面颜色分级方法还可应用于瓷砖以外的其他工业产品检测。

### 参考文献

- Newman T S, Jain A K. A survey of automated visual inspection [J]. *Computer Vision and Image Understanding*, 1995, **61**(2): 231~262.
- Malamas E N, Petrakis E G M, Zervakis M, et al. A survey on industrial vision systems, applications and tools [J]. *Image and Vision Computing*, 2002, **21**(2): 171~188.
- Boukouvalas C, Kittler J, Marik R, et al. Automatic grading of ceramic tiles using machine vision[A]. In: *Proceedings of IEEE International Symposium on Industrial Electronics[C]*, Santiago, Chile, 1994: 13~18.
- Boukouvalas C, Kittler J, Marik R, et al. Automatic color grading of ceramic tiles using machine vision [J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 1997, **44**(1): 132~135.
- Boukouvalas C, Kittler J, Marik R, et al. Color grading of randomly textured ceramic tiles using color histograms [J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 1999, **46**(1): 219~226.
- Boukouvalas C, Petrou M. Perceptual correction for colour grading using sensor transformations and metameric data [J]. *Machine Vision and Applications*, 1999, **11**(2): 96~104.
- Boukouvalas C, Petrou M. Perceptual correction for colour grading of random textures [J]. *Machine Vision and Applications*, 2000, **12**(3): 129~136.
- Kukkonen S, Kalviainen H, Parkkinen J. Color features for quality control in ceramic tile industry [J]. *Optical Engineering*, 2001, **40**(2): 170~177.
- Lu Q, Srikanthswara S, King W, et al. Machine vision system for color sorting wood edge-glued panel parts [A]. In: *Proceedings of 23rd International Conference on Industrial Electronics, Control and Instrumentation [C]*, New Orleans, USA, 1997, **3**: 9~14.
- Lu Qiang, Conners R W, Kline D E, et al. A real-time algorithm for color sorting edge-glued panel parts [A]. In: *Proceedings of International Conference on Image Processing [C]*, Santa Barbara, CA USA, 1997, **1**: 822~825.
- 荆其诚, 焦书兰, 喻柏林等. 色度学 [M]. 北京: 科学出版社, 1979.
- 汤顺青. 色度学 [M]. 北京: 北京理工大学出版社, 1990.
- Mojsilovic A, Hu J, Soljanin E. Extraction of perceptually important colors and similarity measurement for image matching, retrieval and analysis [J]. *IEEE Transactions on Image Processing*, 2002, **11**(11): 1238~1248.
- Mitiche A, Aggarwal J K. Contour registration by shape-specific point for shape matching [J]. *Computer Vision, Graphics and Image Processing*, 1983, **22**(3): 396~408.
- Yang C, Lin J. RWM-cut for color image quantization [J]. *Computers & Graphics*, 1996, **20**(4): 577~588.
- Gabow H N. Efficient implementation of Edmonds' algorithm for maximum matching on graphs [J]. *Journal of the Association for Computing Machinery*, 1976, **23**(2): 221~234.
- Galil Z. Efficient algorithms for finding maximum matching in graphs [J]. *Computing Surveys*, 1986, **18**(1): 23~38.

钟克洪 1974年生,1997年和2000年先后获武汉工业大学(武汉理工大学)自动控制工学学士和控制理论与控制工程工学硕士学位,现为华中科技大学模式识别与智能系统专业博士研究生。主要研究领域为图像处理、模式识别、自动视觉检测等。  
E-mail: zhongkehong@263.net





**丁明跃** 1961 年生,教授,博士生导师,1982 年和 1985 年先后获北京航空学院(北京航空航天大学)电子工程系工学学士学位和成都电讯工程学院(电子科技大学)无线电工学硕士学位,1988 年获华中理工大学(华中科技大学)电子与信息工程系工学博士学位。主要研究领域为计算机视觉、目标识别与跟踪、任务规划、医学图像处理等。



**周成平** 1957 年生,副教授。1979 年获西安交通大学计算数学专业理学学士学位。主要研究领域为任务规划、目标识别与跟踪等。

**周亚安** 1977 年生,2003 年获华中科技大学模式识别与智能系统专业工学硕士学位,现为北京凌云光视数字图像技术有限公司研发工程师,主要从事机器视觉方面的研究。

## 《中国图象图形学报》文后参考文献编排格式

### 1. 专著、论文集、学位论文、报告

[序号]主要责任者.文献题名[文献类型标识].出版地:出版者(或存放单位),出版年.起止页码.

- 1 刘国钧,陈绍业,王凤.图书馆目录[M].北京:高等教育出版社,1957:15~18.
- 2 张筑生.微分半动力系统的不变集[D].北京:北京大学数学系数学研究所,1983.

### 2. 期刊文章

[序号]主要责任者.文献题名[J].刊名,年,卷(期):起止页码.

- 1 金显贺,王昌长,王忠东等.一种用于在线检测局部放电的数字滤波技术[J].清华大学学报(自然科学版),1993,33(4):62~67.

### 3. 论文集集中的析出文章

[序号]析出文献主要责任者.析出文献题名[A].见(In):原文献主要责任者(任选).原文献题名[C].出版地:出版者(或会议地点),出版年:析出文献起止页码.

- 1 钟文发.非线性规划在可燃毒物配置中的应用[A].见:赵玮.运筹学的理论与应用——中国运筹学会第五届大会论文集[C].西安:西安电子科技大学出版社,1996:468~471.
- 2 Middleton V, Owen M J, Elliman D G *et al.* Development in non-axisymmetric filament winding[A]. In:Proceedings of 2nd International Conference on Automated Composite'88 Noordwijkerhout[C], Amsterdam, Netherlands,1988:324~335.

### 参考文献类型及标识

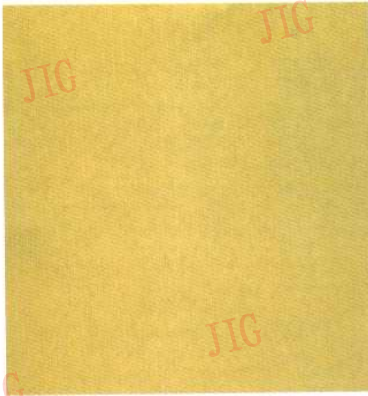
参考文献类型	专著	论文集	报纸文章	期刊文章	学位论文	报告	标准	专利
文献类型标识	M	C	N	J	D	R	S	P

### 电子文献类型参考文献标识

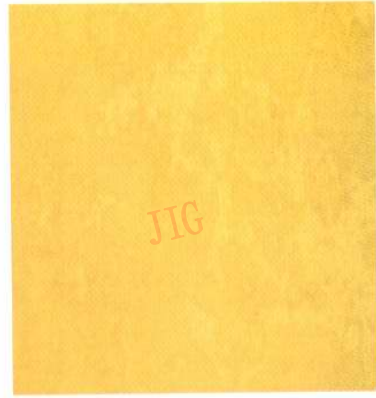
电子参考文献类型	数据库	计算机程序	电子公告
电子文献类型标识	DB	CP	EB

### 载体类型标识

载体类型	联机网络	磁带	光盘	磁盘
载体标识	OL	MT	CD	DK



(a) 单色瓷砖



(b) 纹理瓷砖

图1 实验瓷砖图像

孙 伟等：图像的复数表示及其在图像秘密分存中的应用

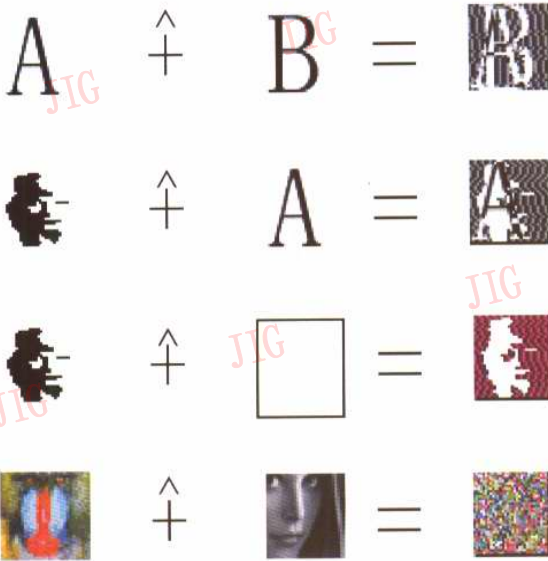


图1 图像加法运算

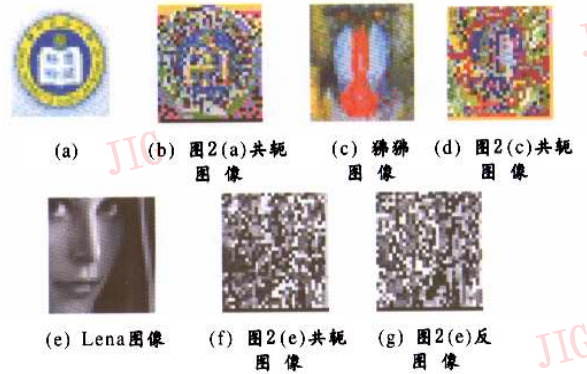


图2 共轭图像和反图像

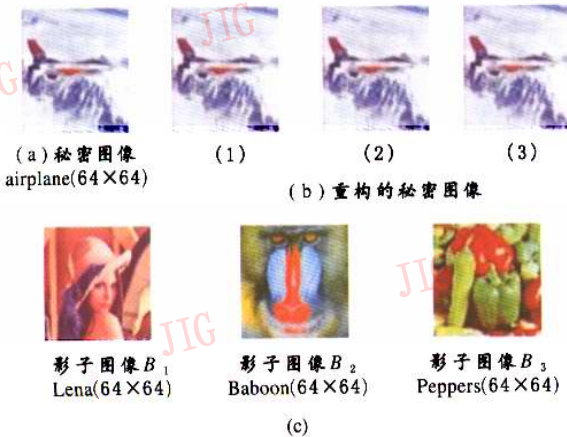


图3 (2,3)门限方案

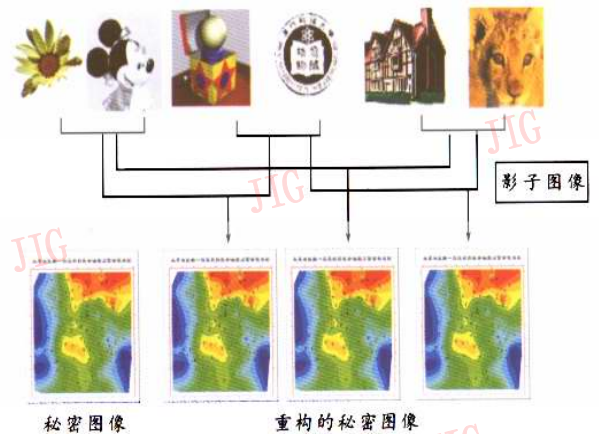


图4 类(4,6)门限方案