

文章编号 1004-924X(2016)05-1206-09

## 条纹颜色分离与聚类

李 华<sup>1,2</sup>, 杨 帆<sup>1,2</sup>, 杨华民<sup>1,2</sup>, 韩 成<sup>1,2\*</sup>, 张 超<sup>1,2</sup>

(1. 长春理工大学 计算机科学技术学院, 吉林 长春 130000;

2. 特种电影技术及装备国家地方联合工程研究中心, 吉林 长春 130000)

**摘要:**为解决彩色物体表面颜色干扰以及条纹之间的颜色串扰导致彩色结构光系统产生的条纹颜色误识别问题,提出了彩色结构光的条纹颜色分离以及聚类方法。首先,提出了一种新的摄像机和投影机的颜色校正方法,以消除外界环境光以及系统的颜色串扰现象,解决系统的耦合性问题。其次,给出了一种物体的反射分离机制,用于提取物体表面的漫反射分量和镜面反射分量,修正彩色物体的背景色对彩色编码条纹的影响。最后,利用颜色聚类算法,对经过彩色物体调制后的条纹进行颜色归类划分,纠正条纹颜色之间的干扰,恢复系统消耗的彩色条纹颜色信息。实验验证了本文提出方法的有效性,结果表明:该方法具有较高的抗干扰能力、较强的鲁棒性,能准确有效地识别受干扰的彩色条纹,识别正确率达到92%左右。

**关键词:**计算机视觉;彩色结构光;彩色物体;反射分离;颜色分离;颜色聚类

**中图分类号:**TP391;TN919.8 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/OPE.20162405.1206

## Separating and clustering of structured light stripe color

LI Hua<sup>1,2</sup>, YANG Fan<sup>1,2</sup>, YANG Hua-min<sup>1,2</sup>, HAN Cheng<sup>1,2\*</sup>, ZHANG Chao<sup>1,2</sup>

(1. College of Computer Science and Technology,

Changchun University of Science and Technology, Changchun 130000, China;

2. National and Local Combined Engineering Research Center of Special Film  
Technology and Equipment, Changchun 130000, China)

\* Corresponding author, E-mail: hancheng@cust.edu.cn

**Abstract:** To overcome the misrecognition for the stripe color from a color structure light system caused by the interference of object surface color and the color crosstalk among the stripes, a method to separate and cluster the structured light stripe color was proposed. Firstly, a novel color correction method for a camera and a projector was designed to avoid the crosstalk phenomenon of color sequence from ambient light and the system and to solve the coupling issues of the system. Then, a reflective separation mechanism was presented to extract the diffuse component and the specular component of object surfaces and to correct the effect of object background color on color-coded stripes. Finally, the color clustering algorithm was used to classify the modulated stripe color and to correct the

收稿日期:2016-01-05;修订日期:2016-03-07.

基金项目:国家科技支撑计划资助项目(No. 2012BAF12B22);吉林省重大科技攻关项目(No. 2012ZDGG004);吉林省科技发展计划资助项目(No. 20130303011GX, No. 20140204050GX);长春市科技计划资助项目(No. 14KG013)

interference among stripes and recover the information of stripe color due to energy consumption of the system. The feasibility of the proposed method was verified. Experimental results show that this method has higher anti-jamming capability and stronger robustness. It recognizes correctly the interfered colored stripes, and the recognition rate reaches about 92%.

**Key words:** computer vision; color structured light; color object; reflection separation; color separation; color clustering

## 1 引 言

三维重构技术一直是计算机视觉研究的热点问题,如何快速、精确地对物体进行重构是逆向工程、计算机动画制作、文物修复等领域致力于解决的关键技术<sup>[1]</sup>。随着三维重构技术的快速发展,从点阵结构光三维信息提取到基于格雷码模式的多帧结构光三维信息获取,重构的精度和速度逐渐提高<sup>[2]</sup>。为了避免格雷码结构光的多帧重建模式,许多学者对其进行研究改进<sup>[3]</sup>,如文献[4]提出了一种将彩色梯度相移法和格雷码编码方法相结合的方法,其在某种程度上减少了投影机投射图案数量,文献[5]将格雷码与颜色信息和正弦光栅相结合进行编码,生成了一副彩色格雷码正弦条纹。

近年来,彩色结构光的单帧重建技术受到广泛关注,其利用不同的颜色编码特征信息作为特征点的唯一标识,通过特征点的解码、匹配进行三维信息求解<sup>[6-7]</sup>。根据编码方式的不同,彩色结构光的重建精度也不同,其中文献[8]利用 De Bruijn 编码方式生成一幅彩色结构光条纹,重建精度较先前算法提高很多。文献[9]从编码条纹的快速解码角度考虑,通过几何约束方式提出了一种利用 De Bruijn 生成由横、竖条纹构成的网格编码投影图像。该方法虽然能够快速准确地对条纹进行解码,但面临彩色物体时会出现约束条件串扰问题,最终导致解码错误。文献[10]针对多投影机彩色结构光颜色的叠加问题,提出利用编码条纹梯度方向的偏导,求解不同投影机的彩色条纹方向,由于该方法利用了不同投影机编码条纹之间的梯度方向关系,因此无法应用于单投影机的彩色物体的三维重建。已往利用彩色结构光进行物体三维物体重建时,通常对待测物体的背景色要求比较严格,一般为白色或者浅色,以避免对彩色条纹造成干扰,从而导致解码不准确。然而这也导致了彩色结构光的普适性受到限制。为了提

高彩色结构光的普适性以及彩色物体的重构精度,文献[11]利用光栅互补结合投影机和摄像机之间的响应模型关系,解算出物体表面点的反射率矩阵,利用反射率矩阵对图像进行补偿,从而完成彩色条纹的分割解码。该方法能够在一定程度上削弱彩色物体背景色的影响。文献[12]提出一种双目立体匹配的彩色物体三维重构方法,该方法通过投射编码条纹所利用的纯色对颜色进行校正,但是该方法在物体背景色较纯时,有一定的干扰误差,没有从根本上解决彩色物体颜色干扰问题。

基于此本文提出了一种彩色结构光的条纹颜色分离以及聚类方法。首先从投影机和摄像机的颜色串扰问题入手,解决了不同颜色通道之间的干扰问题,提高颜色的识别度;再从物体的本征属性着手解决颜色干扰问题,通过物体的反射分离机制提取物体的漫反射分量和镜面反射分量,利用漫反射分量结合颜色映射表以及镜面反射分量的权重大小,提取出彩色条纹的颜色;由于彩色条纹能量信息受损以及彩色条纹之间的颜色干扰问题,因此需利用颜色聚类分析算法对其进行彩色条纹的颜色归类。

## 2 投影机和摄像机的颜色串扰校正

在彩色结构光三维重构系统中,需利用投影机投射彩色编码条纹结合摄像机拍摄调制后的彩色条纹,解算物体的三维特征信息。在这个过程中,由于投影机的三颜色通道在投射过程中存在着颜色光谱曲线重叠干扰现象,导致颜色能量损耗,而摄像机利用不同的颜色通道接收不同颜色的光谱曲线,重叠累积干扰会导致颜色串扰现象,另外,由于摄像机镜头对不同波长消耗的颜色能量不同也会引起颜色信息丢失<sup>[13]</sup>。这种投影机和摄像机之间的耦合性问题,会导致条纹颜色识别错误率高,以至于彩色条纹匹配解出错,重构精度低。为了避免硬件对系统造成的影响,考虑利

用软件的方式对其进行解决。

摄像机拍摄到的光束是从投影机投射的光线,因此投影机投射的彩色编码条纹的光强信息和摄像机接到的颜色光强信息有以下关系:

$$I_C(\lambda) = I_P(\lambda) \cdot K(\lambda) = \text{Pr}_{O_r} \cdot I_P^R(\lambda) \cdot K_r(\lambda) + \text{Pr}_{O_g} \cdot I_P^G(\lambda) \cdot K_g(\lambda) + \text{Pr}_{O_b} \cdot I_P^B(\lambda) \cdot K_b(\lambda), \quad (1)$$

其中:  $I_P(\lambda)$  为投影机投射出的光强,  $I_P^R$ 、 $I_P^G$ 、 $I_P^B$  为 3 个颜色通道的光强,  $I_C(\lambda)$  为摄像机摄取到的光强, 而  $K(\lambda)$  是由物体表面反射系数决定,  $K_r(\lambda)$ 、 $K_g(\lambda)$ 、 $K_b(\lambda)$  为物体对不同颜色的反射系数,  $\text{Pr}_{O_r}$ 、 $\text{Pr}_{O_g}$ 、 $\text{Pr}_{O_b}$  分别为投影机设定像素值的 3 个颜色分量。

摄像机采集的像素 ( $Cam_R$ ,  $Cam_G$ ,  $Cam_B$ ) 可

$$\begin{cases} Cam_R = \text{Pr}_{O_R} \int_0^\infty Cf_R(\lambda) I_P^R(\lambda) \cdot K_r(\lambda) d\lambda + \text{Pr}_{O_G} \int_0^\infty Cf_R(\lambda) I_P^G(\lambda) \cdot K_g(\lambda) d\lambda + \\ \text{Pr}_{O_B} \int_0^\infty Cf_R(\lambda) I_P^B(\lambda) \cdot K_b(\lambda) d\lambda + A_R \\ Cam_G = \text{Pr}_{O_R} \int_0^\infty Cf_G(\lambda) I_P^R(\lambda) \cdot K_r(\lambda) d\lambda + \text{Pr}_{O_G} \int_0^\infty Cf_G(\lambda) I_P^G(\lambda) \cdot K_g(\lambda) d\lambda + \\ \text{Pr}_{O_B} \int_0^\infty Cf_G(\lambda) I_P^B(\lambda) \cdot K_b(\lambda) d\lambda + A_G \\ Cam_B = \text{Pr}_{O_R} \int_0^\infty Cf_B(\lambda) I_P^R(\lambda) \cdot K_r(\lambda) d\lambda + \text{Pr}_{O_G} \int_0^\infty Cf_B(\lambda) I_P^G(\lambda) \cdot K_g(\lambda) d\lambda + \\ \text{Pr}_{O_B} \int_0^\infty Cf_B(\lambda) I_P^B(\lambda) \cdot K_b(\lambda) d\lambda + A_B \end{cases} \quad (3)$$

即:

$$\mathbf{C} = \mathbf{M}_{\text{cross}} \mathbf{K} \mathbf{F}(\mathbf{P}) + \mathbf{A}_0, \quad (4)$$

式中:  $\mathbf{C} = [Cam_R, Cam_G, Cam_B]^T$  为摄像机采集到的像素值,  $\mathbf{M}_{\text{cross}}$  称为投影机和摄像机的串扰矩阵,  $\mathbf{F}(\mathbf{P})$  为投影机编码条纹设定的像素与投射出的像素之间的对应关系,  $\mathbf{A}_0 = [A_R, A_G, A_B]^T$ 。由于串扰矩阵直接影响着投影机和摄像机的耦合性差异, 而且和待测物体无关, 因此可在系统重构之前对颜色串扰现象进行校正。

以往的颜色串扰校正方法都是首先假设颜色校正板(一般为白色板)的反射率  $K=1$ , 再分别投射 3 幅纯色图片, 并且忽略环境光的影响, 解算出串扰矩阵。然而该方法无法找出一个绝对的反射率为 1 的颜色校正板, 因此在后期的求解过程中, 存在着一定的误差影响<sup>[13-14]</sup>。针对此问题, 本文提出了一种新的颜色串扰校正算法, 其具体算法步骤如下:

(1) 首先假定颜色标定板的反射率为 1, 由于投影机和摄像机都是通过 3 种颜色通道进行颜色

以通过摄取到的光强信息以及不同颜色的光谱响应表示, 如公式(2)所示:

$$\begin{cases} Cam_R = \int_0^\infty Cf_R(\lambda) I_C(\lambda) d\lambda + A_R \\ Cam_G = \int_0^\infty Cf_G(\lambda) I_C(\lambda) d\lambda + A_G, \\ Cam_B = \int_0^\infty Cf_B(\lambda) I_C(\lambda) d\lambda + A_B \end{cases} \quad (2)$$

其中:  $Cf_R(\lambda)$ 、 $Cf_G(\lambda)$ 、 $Cf_B(\lambda)$  为摄像机在红绿蓝三颜色通道的光谱响应, 而  $(A_R, A_G, A_B)$  为环境光影响下的像素值。将公式(1)代入到公式(2)中, 可以得到一个投影机投射出的颜色信息值和摄像机采集到的颜色信息值的响应关系式, 如公式(3)所示:

信息处理的, 因此投射颜色值分别为  $[255, 0, 0]^T$ 、 $[0, 255, 0]^T$ 、 $[0, 0, 255]^T$  的 3 幅纯色图像。

(2) 将摄像机采集到的图像信息值的每个颜色分量都减去 3 个颜色通道中的最小值, 以消除环境光的颜色影响, 再通过摄像机采集到的颜色信息求取平均值, 解算出串扰矩阵。

(3) 解算完成后, 再次投射颜色值为  $[0, 255, 255]^T$ 、 $[255, 0, 255]^T$ 、 $[255, 255, 0]^T$  的 3 幅图像, 将摄像机首次采集到的颜色信息值和本次采集到的颜色信息值进行累加, 解算出颜色标定板的反射率。

(4) 根据解算出的颜色标定板的反射率, 再重新利用步骤 2 解算出串扰矩阵  $\mathbf{M}_{\text{cross}}$ , 并求解出串扰矩阵  $\mathbf{M}_{\text{cross}}$  的逆矩阵。

通过上面的颜色校正方法得到颜色串扰矩阵, 再根据公式(5)即可校正投影机和摄像机的耦合性问题, 校正后的颜色信息用向量  $\tilde{\mathbf{C}}$  表示。

$$\tilde{\mathbf{C}} = \mathbf{K}^{-1} \mathbf{M}_{\text{cross}}^{-1} \mathbf{K} \mathbf{M}_{\text{cross}} \mathbf{F}(\mathbf{P}). \quad (5)$$

### 3 彩色条纹颜色的反射分离与聚类

#### 3.1 彩色条纹反射分离机制

投影机投射光束到物体表面上时,物体的本征特性决定物体表面会存在漫反射和镜面反射分量,因此要识别出彩色物体表面调制的颜色信息,需首先提取出物体的反射分量信息值。摄像机在成像的过程中存在着式(6)的形式,其中  $Ref_i(\lambda, P)$  为第  $i$  个颜色通道的信息值,  $Spe(\lambda, P)$  为颜色波长  $\lambda$  在点  $P$  处的光谱反射,而  $W_d(P)$ 、 $W_s(P)$  分别为漫反射分离权重和镜面反射分量权重值,  $Chan_i(\lambda)$  为第  $i$  个颜色通道的光谱值,  $I(\lambda)$  为投影机投射的光谱能量值。

$$Ref_i(\lambda, P) = \int_{\lambda} Spe(\lambda, P) I(\lambda) Chan_i(\lambda) d\lambda = \omega_d(P) \int_{\lambda} Spe_b(\lambda, P) I(\lambda) Chan_i(\lambda) d\lambda + \omega_s(P) Spe_s(\lambda, P) \int_{\lambda} I(\lambda) Chan_i(\lambda) d\lambda \quad (6)$$

由于物体表面某一点的漫反射最大色度总是大于镜面反射的最大色度,因此将公式(6)转换到色度模型上,得到公式(7)的形式,其中  $\Phi_i$ 、 $\Omega_i$  为物体表面的漫反射色度和镜面反射色度值,而  $\Lambda_{d,i}(\lambda, P)$ 、 $\Lambda_{s,i}(\lambda, P)$  则表示物体的本征颜色和投影机投射光源颜色<sup>[15]</sup>。

$$Ref_i(\lambda, P) = \omega_d(P) \Phi_i + \omega_s(P) \Omega_i, \quad (7)$$

其中:

$$\Phi_i = \frac{\Lambda_{d,i}(\lambda, P)}{\Lambda_{d,r}(\lambda, P) + \Lambda_{d,g}(\lambda, P) + \Lambda_{d,b}(\lambda, P)}, \quad \Omega_i = \frac{\Lambda_{s,i}(\lambda, P)}{\Lambda_{s,r}(\lambda, P) + \Lambda_{s,g}(\lambda, P) + \Lambda_{s,b}(\lambda, P)}$$

为了快速分离物体的镜面反射分量和漫反射分量信息值,本文采用以下方式进行处理,利用最大色度和灰度之间的关系,以及漫反射和镜面反射分量之间的相关特性进行分离处理,算法的具体步骤如下:

(1)首先对图像进行归一化处理,则物体表面像素点的镜面反射分量的色度值都一致,公式(7)中  $\Lambda_{s,i}(\lambda, P)$  的各个颜色通道的都是相同的,因此物体表面的镜面反射色度值为一个固定值。

(2)求取物体表面的每个像素点在所有颜色通道内的最大灰度值  $G_{\max}(P)$ , 并利用最大灰度值与3个颜色通道灰度值总和的比值,求解像素的最大色度值  $\partial_{\max}(P)$ 。

(3)利用像素点的最大灰度值以及最大色度值,结合像素点的漫反射最大色度  $\Lambda_{\max}^d(P)$ , 可以求解出该像素点的漫反射分量权重  $W_d(P)$ , 如公式(8)所示:

$$\omega_d(P) = \frac{G_{\max}(P) \cdot (3\partial_{\max}(P) - 1)}{\partial_{\max}(P) \cdot (3\Lambda_{\max}^d(P) - 1)} \quad (8)$$

(4)为了提取漫反射分量值,需设定一个阈值  $\zeta$ , 该阈值的大小和图像上的高光程度相关,通过实验测试发现,针对大多数非均质材料  $\zeta$  取 0.5 较好,而  $\gamma_v$ 、 $\partial_v$  表示所有像素点在3个颜色通道内的最小灰度值的均值和方差,如公式(9)所示,其中  $G_{\min}(P)$  为像素点的所有颜色通道的最小灰度值。

$$Ref_{d,i}(P) = \begin{cases} \Gamma_v = \gamma_v + \zeta \cdot \partial_v \\ \Upsilon_d = \omega_d(P) \cdot [\Lambda_{d,i}(\lambda, P) - \Lambda_{d,\min}(\lambda, P)] \\ \Upsilon_d + \Gamma_v \text{ if } G_{\min}(P) > \Gamma_v \\ \Upsilon_d + G_{\min}(P) \text{ if } G_{\min}(P) \leq \Gamma_v \end{cases} \quad (9)$$

(5)结合公式(10)提取出物体表面的镜面反射分量信息值,其中  $k(P)$  被称为像素的调制比例。

$$Ref_{s,i}(P) = k(P) \cdot [G_{\min}(P) - \Gamma_v] \quad (10)$$

通过上述方法即可快速分离物体的漫反射和镜面反射信息,通过公式(11)来修正彩色物体表面的反射性质对投影机投射的编码结构光的影响,其中  $I_{\text{incid},i}(\lambda)$  为第  $i$  个颜色通道的入射光线强度,  $I_{\text{ref},i}(\lambda)$  为第  $i$  个颜色通道的反射光线强度。

$$I_{\text{incid},i}(\lambda) = \frac{I_{\text{ref},i}(\lambda)}{\omega_s + \omega_d \times k_i} \quad (11)$$

#### 3.2 编码条纹的颜色聚类

由于彩色结构光编码采用 De Bruijn 的编码方式,也就是利用空间中的7种颜色进行彩色条纹的唯一性编码,提取的颜色信息会有一些的损耗,故需对颜色进行归类处理,基于此,本文采用一种颜色聚类的方法进行彩色条纹的信息归类<sup>[16]</sup>。

通过实验发现,在RGB空间中,如果只通过像素点和像素点之间的距离对颜色进行聚类划分是不够合理的,而采用像素点到颜色空间直线的距离进行聚类划分则比较合理。将代表要选取的7种颜色类别的空间直线表示为  $l_i: o_i + v_i x, x \in \mathbb{R}$ , 其中  $o_i$  表示每种颜色的聚类中心坐标,  $v_i$  是代表颜色分类标准的空间直线的方向向量,  $i \in \{ \text{结}$

构光编码时预定的 7 种分类颜色}。

为了求解出空间直线的方向向量  $\mathbf{v}_i$  值, 首先需先由彩色条纹的像素点  $M_k$ , 求解出样本矩阵  $\mathbf{M}$ , 并通过公式(12)和(13)计算样本矩阵  $\mathbf{M}$  的协方差矩阵:

$$\mathbf{cov}_M(r, g, b) = \begin{bmatrix} \text{cov}(r, r) & \text{cov}(r, g) & \text{cov}(r, b) \\ \text{cov}(g, r) & \text{cov}(g, g) & \text{cov}(g, b) \\ \text{cov}(b, r) & \text{cov}(b, g) & \text{cov}(b, b) \end{bmatrix}, \quad (12)$$

$$\text{cov}(X, Y) = \frac{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})(Y_i - \bar{Y})}{n-1}. \quad (13)$$

由于线性矩阵是通过特征值和特征向量共同求解得到的, 因此线性矩阵对应的特征向量不能进行旋转变换, 只可以进行伸缩变换。为了降低不同维度之间的关联性, 需要计算出线性矩阵的

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} \sum_{i=1}^7 [(v_{ib})^2 + (v_{ig})^2] & -\sum_{i=1}^7 v_{ir} v_{ig} & -\sum_{i=1}^7 v_{ir} v_{ib} \\ -\sum_{i=1}^7 v_{ir} v_{ig} & \sum_{i=1}^7 [(v_{ir})^2 + (v_{ib})^2] & -\sum_{i=1}^7 v_{ig} v_{ib} \\ -\sum_{i=1}^7 v_{ir} v_{ib} & -\sum_{i=1}^7 v_{ig} v_{ib} & \sum_{i=1}^7 [(v_{ir})^2 + (v_{ig})^2] \end{bmatrix}, \quad (15)$$

$$\mathbf{B} = \begin{bmatrix} \sum_{i=1}^7 \sum_{j=1}^n [M_{ijr} \cdot (v_{ig}^2 + v_{ib}^2) - M_{ijg} v_{ir} v_{ig} - M_{ijb} v_{ir} v_{ib}] \\ \sum_{i=1}^7 \sum_{j=1}^n [M_{ijg} \cdot (v_{ig}^2 + v_{ib}^2) - M_{ijb} v_{ig} v_{ib} - M_{ijr} v_{ir} v_{ig}] \\ \sum_{i=1}^7 \sum_{j=1}^n [M_{ijb} \cdot (v_{ir}^2 + v_{ig}^2) - M_{ijg} v_{ig} v_{ib} - M_{ijr} v_{ir} v_{ib}] \end{bmatrix}. \quad (16)$$

由于  $\mathbf{A} \cdot \mathbf{o}_i = \mathbf{B}$ , 由定义可知矩阵  $\mathbf{A}$  的行列式不为 0, 即  $\mathbf{A}$  可逆, 所以在方程两边同时乘以  $\mathbf{A}^{-1}$ , 得到  $\mathbf{o}_i = \mathbf{A}^{-1} \cdot \mathbf{B}$ 。通过反复迭代求解, 即可解算出空间拟合直线的原点。通过找出像素点到各个点簇直线的最小值, 即可对像素点进行归类。

#### 4 实验分析

为了验证本文方法的有效性, 搭建了一套基于投影机和摄像机的彩色结构光系统, 该系统所采用的计算机型号为 Dell PRECISION, 其主要用来生成编码的 7 元 3 级的 De Bruijn 彩色结构光条纹, 并用于彩色条纹颜色分离和条纹的聚类识别。投影机采用 View Sonic, 摄像机采用的是

特征值, 由特征值解算出对应的特征向量。求得特征向量即代表了 7 种颜色在空间中的分布趋势, 即点簇的方向矢量  $\mathbf{v}_i$  值。

根据公式(14)解算聚类中心  $\mathbf{o}_i$ , 求得所有彩色条纹的像素点到空间点簇直线  $l_i$  的距离之和的最小值为:

$$d_{\min} = \sum_{i=1}^3 \sum_{j=1}^{N_i} \|\mathbf{v}_i \times (M_{ij} - \mathbf{o}_i)\|^2, \quad (14)$$

其中:  $N_i$  表示像素点与计算距离对应的基本颜色  $i$  属于同一分类的个数。求解的过程中, 将公式(14)转化为向量的点乘。令  $d$  沿 R、G、B 方向的偏导数为 0, 即令  $\frac{\partial d}{\partial o_r} = 0$ ,  $\frac{\partial d}{\partial o_g} = 0$ ,  $\frac{\partial d}{\partial o_b} = 0$ , 可以得到 3 个方程组, 通过提取方程中未知量的系数和常量, 得到矩阵  $\mathbf{A}$  和  $\mathbf{B}$ 。

Cannon Eos。在进行实验前, 需解决投影机和摄像机之间的耦合性问题, 也就是降低两者之间的颜色串扰现象, 因此需要利用一个白色标定板进行串扰矩阵的求解, 解算出串扰矩阵后, 需要利用 Color Checker 色彩标准卡验证本文提出的彩色条纹颜色分离及聚类方法的有效性。

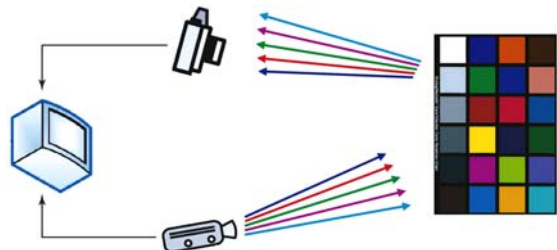


图 1 彩色结构光系统构架

Fig. 1 System architecture of color structured light

#### 4.1 串扰矩阵的求解

由于投影机所投射的编码彩色条纹的光谱在不同通道内有不同的响应,而摄像机对不同光谱的敏感度又有差异,也就是说投影机和摄像机的相同或者不同颜色通道对条纹光谱的响应程度都是不同的。这也是投影机和摄像机之间的颜色耦合性问题,其将直接影响彩色结构光条纹的颜色识别,因此需解决系统的串扰问题。

首先用计算机生成像素分别为 $[255, 0, 0]^T$ 、 $[0, 255, 0]^T$ 、 $[0, 0, 255]^T$ 的3幅纯色图像,然后利用投影机分别将这3组纯色彩色图投射到白色颜色标定板上,再利用以往的方式直接求解颜色串扰矩阵:

$$\mathbf{M}_{\text{cross}}^{\text{radi}} = \begin{bmatrix} 1.3248 & 0.0681 & 0.0020 \\ 0.1262 & 1.3409 & 0.0720 \\ 0.0308 & 0.0623 & 1.3425 \end{bmatrix}. \quad (17)$$

利用本文提出的方法,将计算生成的3幅纯色彩色图像投射到白色标定板上,并将摄像机采集到的图像的每个颜色分量都减去3个颜色通道的最小值,以消除环境光中白色分量的干扰,先假设白色标定板的反射率为1,则求解出的串扰矩阵为:

$$\mathbf{M}_{\text{cross}}^{\text{first}} = \begin{bmatrix} 1.2748 & 0.0281 & 0.0120 \\ 0.0362 & 1.2889 & 0.0320 \\ 0.0098 & 0.0130 & 1.2925 \end{bmatrix}. \quad (18)$$

再分别投射3幅纯色图像,消除环境光后,结合公式(18),反解出白色标定板的反射率,为1.3。最后解算出系统的投影机 and 摄像机的颜色串扰矩阵,如式(19)所示:

$$\mathbf{M}_{\text{cross}} = \begin{bmatrix} 0.9806 & 0.0216 & 0.0092 \\ 0.0278 & 0.9915 & 0.0246 \\ 0.0075 & 0.0100 & 0.9942 \end{bmatrix}. \quad (19)$$

在求解颜色串扰矩阵的过程中,考虑到只利用R、G、B三幅纯色图求解不够精确,文献[12]利用8幅纯色图进行投影计算,然后将3幅不同的纯色图进行分组解算,最后对所有计算结果进行平均值求解。虽然该方式能够在一定程度上消除耦合现象,但是其直接忽略了环境光,且整体计算量较大。而本文提出的方法不仅避免了环境光的干扰,且着重考虑了白色标定板反射率的影响。

本文方法求解到的串扰矩阵参数符合R、G、B颜色通道的本身特性。也就是红色通道所构成

的第一行的第一个参数接近于1且远大于其它参数值,绿色通道所构成的第二行的第二个参数接近于1且远大于其它参数值,蓝色通道所构成的第三行的第三个参数接近于1且远大于其它两个参数值。

通过本文方法对系统的耦合性差异进行修正,可以避免硬件上带来的颜色误差问题,从而使摄像机采集到的颜色信息值更加接近于投影机投射前的编码颜色信息值。

#### 4.2 彩色条纹抗干扰分离及颜色聚类

本系统采用7元3级的De Bruijn彩色条纹编码方法,在该编码序列中,任意连续的3位组合编码都是唯一的,在生成的编码图像背景色为黑色,如图2(彩图见期刊电子版)所示,具体的彩色条纹编码方法可参考文献[16]。

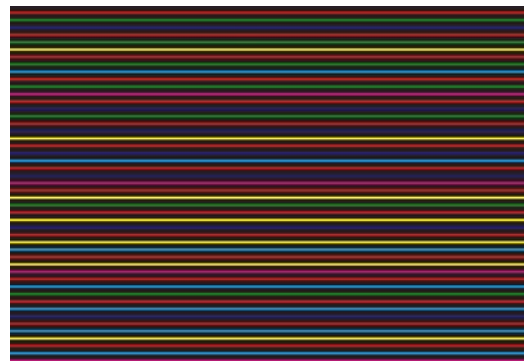


图2 De Bruijn 彩色编码条纹

Fig. 2 De Bruijn color-coded stripes



图3 Color Checker 色彩标准卡

Fig. 3 Color standard card of Color Checker

利用图2的编码条纹通过投影机投射到Color Checker色彩标准卡上,Color Checker色彩标准卡的样式如图3(彩图见期刊电子版)所示。为了观察彩色条纹的干扰情况,倾斜放置色

彩标准卡,如图 4(彩图见期刊电子版)所示。由于黄色条纹易受到色彩标准卡上绿色的干扰,而得到一个绿色混合色,青色条纹易受到色彩标准卡上绿色和黄色的干扰,导致颜色混合为绿色,以及紫色编码条纹易受到红色和黄色的干扰,产生红色混合色等现象。由图 4 可以看出,投影机投射的编码彩色条纹易受彩色物体的背景色干扰。



图 4 色彩标准卡上的彩色条纹

Fig. 4 Color stripes on color standard card

不利用条纹颜色分离机制直接进行彩色条纹中心提取,得到的图像如图 5(彩图见期刊电子版)所示,可以看出编码条纹颜色的识别错误率高,易受到待测物体以及条纹之间颜色串扰问题的影响,因此普适性受到限制。



图 5 未修正的彩色条纹识别

Fig. 5 Recognition of uncorrected color stripes

利用彩色条纹颜色分离机制对色彩标准卡上的编码颜色条纹进行修正,彩色条纹聚类后,如图 6 所示,可以看出条纹的识别度提高了很多。



图 6 修正后的彩色条纹

Fig. 6 Corrected color stripes

为了进一步验证本方法在非标准色度板背景下的可用性,将基于 De Bruijn 的彩色编码条纹投射到如图 7(彩图见期刊电子版)所示的彩色物体上,对其局部区域进行实验分析。直接通过传统方式对彩色结构光进行解码,即未进行修正的彩色条纹提取结果如图 8(彩图见期刊电子版)所示,而利用本方法进行修正后的彩色条纹如图 9(彩图见期刊电子版)所示。为了验证本方法的识别正确率,根据条纹颜色识别正确的像素个数与总像素个数的比值得到识别正确率。未进行修正的彩色条纹的识别正确率为 54%,而通过本文方法进行修正后的彩色条纹的识别正确率达到 92%左右。

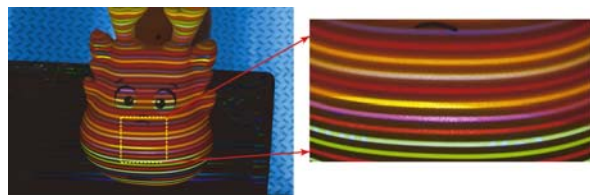


图 7 彩色物体表面投射的彩色结构光

Fig. 7 Color structured light projected from a colored object surface

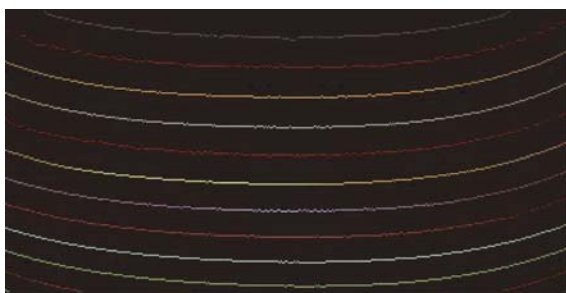


图8 未修正的彩色条纹识别

Fig.8 Recognition of uncorrected color stripes

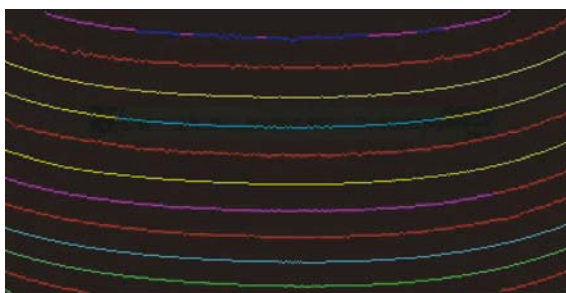


图9 修正后的彩色条纹

Fig.9 Corrected color stripes

## 参考文献:

- [1] RADU O, JOAQUIM S, MIHAELA G, *et al.*. Structured light self-calibration with vanishing points [J]. *Machine Vision and Applications*, 2014, 25(2):489-500.
- [2] 贾小军, 张之江, 曹芳, 等. 编码结构光系统模型及误差分析[J]. *光学精密工程*, 2011, 19(4):717-727. JIA X J, ZHANG ZH J, CAO F, *et al.*. System model and error analysis for coded structure light [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2011, 19(4):717-727. (in Chinese)
- [3] 陆军, 李积江, 黄春明. 符号 M 阵列结构光的解码 [J]. *光学精密工程*, 2013, 21(4):1069-1078. LU J, LI J J, HUANG CH M. Decoding of structured light based on symbol M-array [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2013, 21(4):1069-1078. (in Chinese)
- [4] 单鹂娜, 于晓洋, 于双, 等. 彩色梯度相移与格雷码相结合的三维测量方法[J]. *光学精密工程*, 2010, 18(11):2497-2504. SHAN L N, YU X Y, YU SH, *et al.*. Three dimensional measurement method combining color trapezoidal phase-shifting with color gray code [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2010, 18(11):2497-2504. (in Chinese)
- [5] 麻珂, 张启灿. 分离物体三维测量的彩色结构光编码新方法[J]. *中国激光*, 2010, 37(11):2918-2924. MA K, ZHANG Q C. A new color structured light coding method for three-dimensional measurement of isolated objects [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2010, 37(11):2918-2924. (in Chinese)
- [6] SERGIO F. *One-shot pattern projection for dense and accurate 3D reconstruction in structured light* [D]. Girona: University of Girona, 2012.
- [7] 韩成, 秦贵和, 宫宇, 等. 基于彩色结构光的三维重构方法[J]. *吉林大学学报:工学版*, 2013, 43(5):1343-1351. HAN CH, QIN G H, GONG Y, *et al.*. Method for three dimensional reconstruction based on color structured light [J]. *Journal of Jilin University: Engineering and Technology Edition*, 2013, 43(5):1343-1351. (in Chinese)
- [8] WONKWI J, CHANGSOO J, YONGDUEK S, *et al.*. Structured-light stereo: Comparative analysis and integration of structured-light and active stereo for measuring dynamic shape[J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2013, 51(11):1255-126.
- [9] ALI O U, FATIH C, GABRIEL T. Robust one-shot 3D scanning using loopy belief propagation [C]. *IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition Workshops*

## 5 结 论

为了提高彩色物体的三维测量技术,必须首先解决彩色物体的背景色对彩色编码条纹造成的干扰问题。若要快速分离彩色物体表面的背景色和投影机投射的编码条纹颜色,只有准确识别调制后的彩色条纹才能精确地对物体进行测量,这是计算机视觉和三维重建领域的研究热点问题。本文对此进行了一系列研究,首先削弱投影机和摄像机之间的颜色耦合问题,再通过软件方式消除硬件对系统造成的干扰,在利用彩色物体的反射分量机制修正投影仪投射的彩色结构光编码条纹。通过实验可以看出,本文方法对干扰的彩色条纹识别正确率达到 92% 左右,能够克服编码条纹之间的干扰,并解决了修正彩色条纹分量后信息丢失问题。

- (CVPRW), San Francisco, US; CA, 2010, 15-22.
- [10] JE C, LEE K H, LEE S W. Multi-projector color structured-light vision [J]. *Signal Processing: Image Communication*, 2013, 28(9):1046-1058.
- [11] 胡路遥, 达飞鹏, 王露阳. 一种针对彩色物体的光栅投影三维测量方法 [J]. *光学学报*, 2012, 32(2):0212002.
- HU L Y, DA F P, WANG L Y. A novel color fringe projection method for 3D measurement of colorful objects [J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, 32(2):0212002. (in Chinese)
- [12] 车建强, 戴宁, 崔海华, 等. 面向彩色物体的双目三维测量编码新方法 [J]. *光学学报*, 2014, 34(11):0212002.
- CHE J Q, DAI N, CUI H H, *et al.*. A novel encoding method for binocular three-dimensional measurement of color objects [J]. *Acta Optica Sinica*, 2014, 34(11):0212002. (in Chinese)
- [13] CASPI D, KIRYATI N, SHAMIR J. Range imaging with adaptive color structured light [J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 1998, 20(5): 470-480.
- [14] 汤一平, 宗明理, 吴立娟. 基于双色反射模型的彩色结构光颜色识别的研究 [J]. *计算机学报*, 2013, 36(9):1908-1916.
- TANG Y P, ZONG M L, WU L J. Research on identification of color structured light based on dichromatic reflection model [J]. *Chinese Journal of Computers*, 2013, 36(9):1908-1916. (in Chinese)
- [15] SHEN H L, CAI Q Y. Simple and efficient method for specular removal in an image [J]. *Applied Optics*, 2009, 48(14):2711-2719.
- [16] 范静涛, 韩成, 张起, 等. 一种新的 De Bruijn 彩色结构光解码技术研究 [J]. *电子学报*, 2012, 40(3): 483-488.
- FAN J T, HAN CH, ZHANG CH, *et al.*. Study of a new decoding technology for De Bruijn structured light [J]. *Acta Electronic Sinica*, 2012, 40(3):483-488. (in Chinese)

#### 作者简介:



李 华(1977—),女,黑龙江北安人,博士研究生,副教授,2003年于长春理工大学获得硕士学位,主要从事虚拟现实及增强现实技术的研究。E-mail: lihua@cust.edu.cn

#### 通讯作者:



韩 成(1978—),男,吉林省吉林人,博士,副教授,2010年于长春理工大学计量技术及仪器专业获得博士学位,主要从事数字媒体技术与系统、计算机图形图像处理与识别、计算机仿真建模与虚拟现实技术等方面的研究。E-mail: hancheng@cust.edu.cn

#### 导师简介:



杨华民(1963—),男,吉林长春人,博士生导师,1995年于吉林大学获得硕士学位,2001年考取长春理工大学光学工程博士研究生,1986年,由学校选派到美国进修,学习 VAX8600 计算机。现为长春理工大学副校长、长春中国光学科学技术馆馆长,主要从事计算机视觉、数字媒体技术与系统、图像处理等方面的研究。E-mail: yhm@cust.edu.cn

(版权所有 未经许可 不得转载)