

一种新的 De Bruijn 彩色结构光解码技术研究

范静涛, 韩 成, 张 超, 李明勋, 白宝兴, 杨华民

(长春理工大学计算机科学技术学院, 吉林长春 130022)

摘 要: 为了有效地对 De Bruijn 彩色结构光编码图像进行高精度的解码, 提出了一种新的解码方法, 该方法包括基于梯度分析的中心彩色条纹提取方法、基于聚类分析的颜色分类方法和基于双梯度多通道动态规划的特征点匹配方法. 该方法适用于每类颜色的像素点成线性分布的调制后结构光图像, 能够有效地消除颜色干扰; 同时充分利用局部邻域信息, 有效地解决了特征点的匹配问题, 提高了解码精度. 实验表明该方法在不需要假定待测物体全表面单调和严格限制其连续性的条件下, 可以有效地改善解码精度, 具有较强的鲁棒性.

关键词: 彩色结构光; De Bruijn 编码; 聚类分析; 动态规划; 结构光解码

中图分类号: TP391.9 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2012) 03-0483-06

电子学报 URL: <http://www.ejournal.org.cn>

DOI: 10.3969/j.issn.0372-2112.2012.03.012

Study of a New Decoding Technology for De Bruijn Structured Light

FAN Jing-tao, HAN Cheng, ZHANG Chao, LI Ming-xun, BAI Bao-xing, YANG Hua-min

(Department of Computer Science and Technology, Changchun University of Science and Technology, Changchun, Jilin 130022, China)

Abstract: A new method is proposed aiming at decoding De Bruijn color encoded structured light images with high precision. This method is composed of the central color stripe identification based on gradient analysis, the color classification based on clustering analysis and the feature point matching based on double-gradient and multi-pass dynamic programming. The method can be applied to avoid color interference effectively in the encoded structured light images containing parallel pixel lines with different colors. Moreover, by making full use of local neighborhood information, the method can match every feature point. Experimental results show that the proposed method effectively improves the decoding accuracy without assuming that the surface of the target object is monotonous or restricting its continuity, and also exhibits good robustness.

Key words: color structured light; De Bruijn coding; clustering analysis; dynamic programming; decoding structured light

1 引言

结构光三维重构方法主要分为两部分, 第一部分是投影结构光编码图像并拍摄获得调制后的结构光图像, 然后对调制后的结构光图像进行解码得到图像的特征信息; 第二部分是根据投影机、摄像机和待测表面的相对位置把调制后结构光图像的特征信息转化为待测表面的三维信息. 在基于结构光的三维重构过程中, 可以利用各种编码策略使像素点本身带有先验编码信息, 编码策略选择的合适与否影响着匹配算法的复杂性和三维重构的精确性^[1].

在对编码条纹进行解码时, 对较细条纹进行预处理的过程中常会出现图像信息的丢失现象, 导致解码序列的求取出现错误. 为了进行高精度的解码, 很多研究人员都尝试了不同的方法, 如: 吴家勇等人^[2]提出了一种

基于梯度重心法的线结构光光带中心快速亚像素提取方法; 张超等人^[3]提出了一系列图像预处理方法, 以更加准确地提取较细条纹; 李中伟等人^[4]提出了结合梯度锐化和重心法的光条中心提取方法; 黄军春等人^[5]提出了一种新颖的基于彩色结构光的实时三维重建方法; Philipp Fechter 等人^[6]提出了自适应彩色分类方法和捕获 3D 模型的方法; Rifat Benveniste 等人^[7]提出了一种基于二值编码结构光面扫描仪的颜色不变方法, 消除了光亮表面或环境光的影响; Zhang 等人^[8]提出了基于多通道动态规划思想的解码方法. 这些方法的提出在很大程度上提高了解码的精确性, 但很容易受到 CCD 摄像机的颜色保真度及分辨率的影响而无法得到理想的效果和精度, 很难用于精确物体的重构与测量. 同时, 由于运用的颜色一般多于三种, 容易出现颜色混淆不易识别的问题, 而且通常采样密度和分辨率都不高. 现有基

于多通道动态规划的解码方法,没有充分考虑局部邻域信息,解码精度不高.

为此,本文针对基于7元3级迪布鲁英序列的编码图像,提出了一种新的高精度解码方法,该方法包括基于梯度分析的中心彩色条纹提取方法、基于聚类分析的颜色分类方法和基于双梯度多通道动态规划特征点匹配方法.

2 基于7元3级迪布鲁英序列的编码方法

迪布鲁英伪随机序列系列具有预先的可确定性和可重复性,主要应用在保密通信、扩频通信和调频通信等领域. n 元 m 级迪布鲁英序列是一个长度为 n^m 的循环圈,循环圈中的每一个元素取自 n 个基元,基元可以为任意数字或符号.序列中任意连续的 m 位组合都是唯一的,这称为迪布鲁英序列的窗口特性.产生迪布鲁英序列的方法很多,如计算机搜索算法,加元算法,升级算法等.

在利用具有随机特性与确定性的迪布鲁英伪随机序列进行结构光编码时,预先指定7种颜色,分别用 $a_1, a_2, a_3, a_4, a_5, a_6, a_7$ 表示,其中:颜色 a_1 的归一化RGB值分别为0,0,1;颜色 a_2 的归一化RGB值分别为0,1,0;颜色 a_3 的归一化RGB值分别为0,1,1;颜色 a_4 的归一化RGB值分别为1,0,0;颜色 a_5 的归一化RGB值分别为1,0,1;颜色 a_6 的归一化RGB值分别为1,1,0;颜色 a_7 的归一化RGB值分别为1,1,1.7种颜色分别与数字0,1,2,3,4,5,6对应,并将这7个数字作为生成序列的基元,选择窗口大小为3,按照某一生成算法生成迪布鲁英序列,据此即可产生一幅基于7元3级迪布鲁英序列彩色结构光编码图像,如图1所示.从图1可知,该图像背景颜色为黑色,其RGB值都为0,每条彩色条纹的宽度为一个像素,相邻两条彩色条纹间隔3个像素.



图1 迪布鲁英序列的颜色结构光编码图像

3 彩色结构光解码方法

通过投影机将基于7元3级迪布鲁英序列生成的彩色结构光编码图像投影到待测表面上,使用摄像机拍摄调制后的编码图像.由于待测物体面形的调制、相邻彩色条纹之间的颜色干扰、投影机和摄像机配置的影响等原因,导致调制后投影图像彩色条纹的形状、位置、颜色等发生变化.为此必须对调制后投影图像中的所有条纹进行解码,确定条纹在调制前后投影图像中的对应关系才能进一步计算出彩色条纹上的每一个像素点的空间三维坐标.

在解码过程中,首先是使用基于梯度分析的方法提取每一条中心彩色条纹;然后是使用基于聚类分析的方法确定中心彩色条纹的颜色;最后是使用基于双梯度多通道动态规划的方法确定调制后投影图像中心彩色条纹上的每个像素点与原始编码图像中彩色条纹的匹配关系.针对每一步骤,本文都提出了比较优化的算法,这在三维立体重建过程中起到了关键作用.

在解码过程中,首先是使用基于梯度分析的方法提取每一条中心彩色条纹;然后是使用基于聚类分析的方法确定中心彩色条纹的颜色;最后是使用基于双梯度多通道动态规划的方法确定调制后投影图像中心彩色条纹上的每个像素点与原始编码图像中彩色条纹的匹配关系.针对每一步骤,本文都提出了比较优化的算法,这在三维立体重建过程中起到了关键作用.

3.1 基于梯度分析的中心彩色条纹提取

由于经过待测表面的调制、摄像机和投影机的分辨率、位置等原因,摄像机拍摄得到的调制后投影图像中彩色条纹的宽度会发生变化,因此需要提取每一条彩色条纹的中心条纹.为了精确地提取中心彩色条纹,首先需要对调制后的投影图像进行灰度化和归一化,由灰度归一化后图片上所有像素点的灰度值按照从左到右,从上到下的顺序构造矩阵 I ,设矩阵 I 有 u 行, v 列.每一列像素点的灰度值会呈现出一种波形形状,如图2所示.由图2可知,该曲线会存在一些干扰,即噪声.因此,需要根据式(1)对每一列像素点的灰度值进行滤波处理,式中的矩阵 I_s 为调制后投影图像上像素点经过滤波后的灰度值.

$$\begin{cases} I_s(1, j) = I(1, j) \\ I_s(2, j) = (I(1, j) + I(2, j) + I(3, j))/3 \\ I_s(i, j) = (I(i-2, j) + 2 \times I(i-1, j) + 3 \times I(i, j) + \\ \quad 2 \times I(i+1, j) + I(i+2, j))/9 \\ I_s(u-1, j) = (I(u-2, j) + I(u-1, j) + I(u, j))/3 \\ I_s(u, j) = I(u, j) \end{cases} \quad (1)$$

其中 $i = 3, 4, \dots, u-2$.

经过滤波后,根据矩阵 I_s 每一列元素形成的波形,

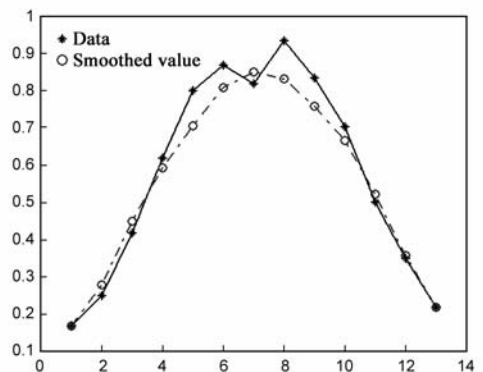


图2 滤波效果图

找到波形中每一个波峰和波谷处像素点的位置,然后根据相邻波峰和波谷的位置计算波峰和波谷间的中间位置.最后在每两个相邻的中间位置之间,在矩阵 \mathbf{I} 中找到第一个最大或最小的灰度值,该像素点就是调制后结构光图像中的特征点,由所有特征点构成中心彩色条纹.

3.2 基于聚类分析的颜色分类方法

聚类是将未知类别标号的样本集划分为内在的多个类别,并使得同一个类内的样本具有较高的相似度;而不同类中的样本具有较低的相似度^[9,10].由于投影机和摄像机的配置、相邻彩色条纹之间的干扰、待测表面对不同颜色条纹的反射和吸收特性不同等原因,导致普通的颜色分类方法无法得到高精度的颜色分类结果,为此,本文提出了一种基于聚类分析的颜色分类方法,该方法的具体步骤如下:

步骤 1 根据式(2)分别计算 RGB 颜色空间中的每一个特征点到原始编码图像中 7 个颜色聚类的中心直线间的距离,式中 $\mathbf{Z}(i, j, k)$ 表示第 i 行,第 j 列特征点在 RGB 颜色空间中的第 k 个坐标值, $\mathbf{O}(k)$ 表示 RGB 颜色空间中原点的第 k 个坐标值, $\mathbf{C}(s, k)$ 表示彩色结构光编码图像中的 7 种颜色中的第 s 种颜色在 RGB 空间中的第 k 个坐标, $\mathbf{D}(i, j, s)$ 表示第 i 行,第 j 列特征点到第 s 条颜色聚类中心直线的距离.

$$\mathbf{D}(i, j, s) = \left\{ \begin{array}{l} \sum_{k=1}^3 (\mathbf{Z}(i, j, k) - \mathbf{O}(k))^2 - \\ \left[\sum_{k=1}^3 (\mathbf{C}(s, k) \times (\mathbf{Z}(i, j, k) - \mathbf{O}(k))) \right]^2 \end{array} \right\}^{\frac{1}{2}} \quad (2)$$

步骤 2 根据每个特征点到 7 条颜色聚类中心直线距离的最小值对特征点进行颜色分类.如果这次分类后,属于每一类颜色的特征点没有任何变化,那么对调制后投影图像中特征点的颜色分类的工作结束,否则继续执行步骤 3.

步骤 3 根据属于每一类颜色中的特征点的 RGB 值和式(3)构造对称矩阵 \mathbf{E}_q ,式中 N_q 表示属于第 q 种颜色的特征点的个数.

$$\left\{ \begin{array}{l} \mathbf{E}_q(1,1) = \sum_{i=1}^{N_q} ((\mathbf{I}_q(i,1) - \mathbf{O}(1))^2 / \mathbf{D}_q(i)) \\ \mathbf{E}_q(1,2) = \sum_{i=1}^{N_q} \frac{(\mathbf{I}_q(i,1) - \mathbf{O}(1)) \times (\mathbf{I}_q(i,2) - \mathbf{O}(2))}{\mathbf{D}_q(i)} \\ \mathbf{E}_q(1,3) = \sum_{i=1}^{N_q} \frac{(\mathbf{I}_q(i,1) - \mathbf{O}(1)) \times (\mathbf{I}_q(i,3) - \mathbf{O}(3))}{\mathbf{D}_q(i)} \\ \mathbf{E}_q(2,2) = \sum_{i=1}^{N_q} ((\mathbf{I}_q(i,2) - \mathbf{O}(2))^2 / \mathbf{D}_q(i)) \\ \mathbf{E}_q(2,3) = \sum_{i=1}^{N_q} \frac{(\mathbf{I}_q(i,2) - \mathbf{O}(2)) \times (\mathbf{I}_q(i,3) - \mathbf{O}(3))}{\mathbf{D}_q(i)} \\ \mathbf{E}_q(3,3) = \sum_{i=1}^{N_q} ((\mathbf{I}_q(i,3) - \mathbf{O}(3))^2 / \mathbf{D}_q(i)) \end{array} \right. \quad (3)$$

然后计算 7 个矩阵 \mathbf{E}_q 的特征值与每个矩阵的最大特征值所对应的特征向量,将该特征向量转化为单位向量,并替代矩阵 \mathbf{C} 的第 q 行向量.

根据式(4)构造对称矩阵 \mathbf{A} ,式中 t 为向量 \mathbf{D}_q 的个数;

$$\left\{ \begin{array}{l} \mathbf{A}(1,1) = \sum_{q=1}^t (N_q \times (\mathbf{C}(q,2)^2 + \mathbf{C}(q,3)^2)) \\ \mathbf{A}(1,2) = - \sum_{q=1}^t (N_q \times \mathbf{C}(q,1) \times \mathbf{C}(q,2)) \\ \mathbf{A}(1,3) = - \sum_{q=1}^t (N_q \times \mathbf{C}(q,1) \times \mathbf{C}(q,3)) \\ \mathbf{A}(2,2) = \sum_{q=1}^t (N_q \times (\mathbf{C}(q,3)^2 + \mathbf{C}(q,1)^2)) \\ \mathbf{A}(2,3) = - \sum_{q=1}^t (N_q \times \mathbf{C}(q,2) \times \mathbf{C}(q,3)) \\ \mathbf{A}(3,3) = \sum_{q=1}^t (N_q \times (\mathbf{C}(q,1)^2 + \mathbf{C}(q,2)^2)) \end{array} \right. \quad (4)$$

然后根据式(5)构造向量 \mathbf{B} ,根据式(6)修改 RGB 颜色空间原点的坐标,然后转而执行步骤 2.

$$\left\{ \begin{array}{l} \mathbf{B}(1) = \sum_{q=1}^t \sum_{i=1}^{N_q} \mathbf{I}_q(i,1) \times (\mathbf{C}(q,2)^2 + \mathbf{C}(q,3)^2) \\ \quad - \mathbf{I}_q(i,2) \times \mathbf{C}(q,1) \times \mathbf{C}(q,2) \\ \quad - \mathbf{I}_q(i,3) \times \mathbf{C}(q,1) \times \mathbf{C}(q,3) \\ \mathbf{B}(2) = \sum_{q=1}^t \sum_{i=1}^{N_q} \mathbf{I}_q(i,2) \times (\mathbf{C}(q,1)^2 + \mathbf{C}(q,3)^2) \\ \quad - \mathbf{I}_q(i,1) \times \mathbf{C}(q,2) \times \mathbf{C}(q,1) \\ \quad - \mathbf{I}_q(i,3) \times \mathbf{C}(q,2) \times \mathbf{C}(q,3) \\ \mathbf{B}(3) = \sum_{q=1}^t \sum_{i=1}^{N_q} \mathbf{I}_q(i,3) \times (\mathbf{C}(q,1)^2 + \mathbf{C}(q,2)^2) \\ \quad - \mathbf{I}_q(i,1) \times \mathbf{C}(q,1) \times \mathbf{C}(q,3) \\ \quad - \mathbf{I}_q(i,2) \times \mathbf{C}(q,2) \times \mathbf{C}(q,3) \\ \mathbf{O} = \mathbf{A}^{-1} \mathbf{B} \end{array} \right. \quad (5)$$

3.3 基于双梯度多通道动态规划的特征点匹配方法

基于双梯度多通道动态规划特征点匹配方法首先假设共得到 m 条中心彩色条纹,每条中心彩色条纹有 n 个像素点,由所有调制后投影图像中特征点组成的矩阵用 \mathbf{Z} 表示,然后计算矩阵 \mathbf{Z} 的两类梯度值矩阵,第一类梯度值矩阵用 \mathbf{T}_1 表示,第二类梯度值矩阵用 \mathbf{T}_2 表示;矩阵 \mathbf{Z} 的最后一行的每个像素点的第一类梯度值与该像素点的归一化 RGB 值相同,矩阵 \mathbf{Z} 的第一行的每个像素点的第二类梯度值与该像素点的归一化 RGB 值相同.

两类梯度值矩阵的其他元素可以根据式(7)和式(8)计算得到:

$$\begin{cases} T1(i, j, 1) = Z(i, j+1, 1) - Z(i, j, 1) \\ T1(i, j, 2) = Z(i, j+1, 2) - Z(i, j, 2) \\ T1(i, j, 3) = Z(i, j+1, 3) - Z(i, j, 3) \end{cases} \quad (7)$$

$$\begin{cases} T2(i, j, 1) = Z(i, j, 1) - Z(i, j-1, 1) \\ T2(i, j, 2) = Z(i, j, 2) - Z(i, j-1, 2) \\ T2(i, j, 3) = Z(i, j, 3) - Z(i, j-1, 3) \end{cases} \quad (8)$$

上式中 $Z(i, j, 1)$, $Z(i, j, 2)$, $Z(i, j, 3)$ 分别表示第 i 行, 第 j 列特征点的归一化 RGB 值. 利用同样的方法计算得到基于 7 元 3 级迪布鲁英序列彩色结构光编码图像中的彩色条纹上的像素点所对应的第一类和第二类梯度值矩阵, 分别用 $T'1$ 和 $T'2$ 表示.

矩阵 $T'1$ 的任意一行与矩阵 $T1$ 的每一列元素的匹配度可根据式(9)、式(10)和式(11)计算得到:

$$Co(i, j, c) = \begin{cases} -1 & T1(k, j, c) < -0.55 \\ \frac{T1(k, j, c) - 0.15}{0.7} & -0.55 < T1(k, j, c) \leq 0.85 \\ 1 & T1(k, j, c) > 0.85 \end{cases} \quad (9)$$

$$Co(i, j, c) = \begin{cases} -1 & |T1(k, j, c)| > 1.55 \\ 1 - \frac{|T1(k, j, c)| - 0.15}{0.7} & 0.15 < |T1(k, j, c)| \leq 1.55 \\ 1 & |T1(k, j, c)| < 0.15 \end{cases} \quad (10)$$

$$Co(i, j, c) = \begin{cases} -1 & T1(k, j, c) > 0.55 \\ -\frac{T1(k, j, c) - 0.15}{0.7} & -0.85 < T1(k, j, c) \leq 0.55 \\ 1 & T1(k, j, c) < -0.85 \end{cases} \quad (11)$$

上式中 $T'1(i, j, 1)$, $T'1(i, j, 2)$, $T'1(i, j, 3)$ 分别表示原始编码图像中的彩色条纹上的第 j 列的第 i 个特征点的归一化 RGB 值所对应的第一类梯度值, $T1(k, j, 1)$, $T1(k, j, 2)$, $T1(k, j, 3)$ 分别表示矩阵 $T1$ 中第 k 行, 第 j 列特征点的归一化 RGB 值所对应的第一类梯度值, 依照此方法可以依次得到 n 个 $m \times m$ 矩阵, 分别用 $Co1$, $Co2$, \dots , Con 表示. 根据以上的方法可以计算矩阵 $T'2$ 的任意一行与矩阵 $T2$ 的每一列元素的匹配度依次得到 n 个 $m \times m$ 矩阵, 分别用 $Do1$, $Do2$, \dots , Don 的表示. 根据矩阵 Cok 和 Dok 构造矩阵 Ek , $k = 1, 2, \dots, n$; 矩阵 Ek 的第一行和第一列的元素取矩阵 Dok 的对应的元素中最小的一个值, 最后一行和最后一列的元素取矩阵 Co 的对应的元素中最小的一个值, 其它元素取对应的矩阵 Cok 和 Dok 中最小的一个值; 由此可以依次得到 n 个 $m \times m$ 矩阵, 分别用 $E1$, $E2$,

\dots , En 的表示.

根据每一个矩阵 Ek 构造矩阵 Hk , 其中矩阵 Hk 中的第一行和第一列中所有元素与矩阵 Ek 中对应位置的元素相同, 然后根据式(12)构造矩阵 Hk 的其余部分.

$$Hk(i, j) = \max\{Hk(i-1, j), Hk(i-1, j-1) + Ek(i, j), Hk(i, j-1)\}, \quad k=1, 2, \dots, n \quad (12)$$

由此可以得到 n 个 H 矩阵, 分别用 $H1$, $H2$, \dots , Hn 来表示; 设有 n 个 $m \times m$ 矩阵, 分别用 $L1$, $L2$, \dots , Ln 来表示, 其中矩阵 Lk 中的第一行和第一列中的元素的值都为 0, 如果 $Hk(i, j)$ 的值是通过公式 $Hk(i, j) = Hk(i-1, j-1) + Ek(i, j)$ 得到的, 那么 $Lk(i, j)$ 的值为 1; 如果 $Hk(i, j)$ 的值是通过公式 $Hk(i, j) = Hk(i, j-1)$ 得到的, 那么 $Lk(i, j)$ 的值为 2; 如果 $Hk(i, j)$ 的值是通过公式 $Hk(i, j) = Hk(i-1, j)$ 得到的, 那么 $Lk(i, j)$ 的值为 0.

设向量 E' 是由原始编码图像中的某一列彩色像素点组成的, 依次利用 n 个矩阵 $L1$, $L2$, \dots , Ln , 从 $Lk(m, m)$ 元素开始, 依次计算包括其在内的 2×2 矩阵内每一 Lk 元素的值, 然后在矩阵 Z 中像素点寻找与向量 E' 中像素点的匹配关系, 当 $Lk(m, m)$ 的值为 0 或 2 时, 矩阵 Z 中没有与像素点 $E'(m)$ 匹配的像素点, 当 $Lk(m, m)$ 的值为 1 时, 与像素点 $E'(m)$ 匹配的像素点为 $Z(m, k)$ 如此继续下去.

设当 j 大于等于 2 时, 需要对 $Lk(2, j)$ 寻找与 $E'(2)$ 的匹配点, 如果 $Lk(2, j)$ 的值为 1, 那么与像素点 $E'(2)$ 匹配的像素点为 $Z(j, k)$ 且与像素点 $E'(1)$ 匹配的像素点为 $Z(j-1, k)$; 如果 $Lk(2, j)$ 的值为 0 或 2, 那么没有与像素点 $E'(2)$ 匹配的像素点, 也没有与像素点 $E'(1)$ 匹配的像素点.

设当 i 大于等于 2 时, 需要对 $Lk(i, 2)$ 寻找与 $E'(i)$ 的匹配点, 如果 $Lk(i, 2)$ 的值为 1, 那么与像素点 $E'(i)$ 匹配的像素点为 $Z(j, k)$ 且与像素点 $E'(i-1)$ 匹配的像素点为 $Z(1, k)$; 如果 $Lk(i, 2)$ 的值为 0 或 2, 那么没有与像素点 $E'(i)$ 匹配的像素点, 也没有与像素点 $E'(i-1)$ 匹配的像素点.

如果 j 的值为 1 或 i 的值为 1, 在矩阵 Z 中像素点寻找与向量 E' 中像素点的匹配关系结束. 在调制后投影图像中去掉已经找到匹配关系的特征点, 然后再次使用上面的方法, 继续寻找匹配的特征点, 直到调制后投影图像中的特征点全部找到匹配关系.

4 实验结果与分析

彩色结构光编解码实验包括硬件部分和软件部分. 实验系统的硬件部分由计算机、投影机、摄像机、待测物体及连接线组成. 其中使用的计算机型号是 DELL

DIMENSION 5150, 主要用来生成编码图像, 拍摄照片和进行解码操作; 由于目前的家用投影机的投影效果已经非常好, 因此普通的家用投影机基本上都可以满足本系统对于投影机的投影要求, 本系统所用的投影机型号是 EPSON EB-W6; 摄像机是三维重构系统中的一个关键组成部分, 其工作主要是摄取编码图像, 本系统使用的是 Canon EOS. 系统的软件部分包括彩色结构光编码模块、提取中心彩色条纹模块、中心彩色条纹颜色确定模块、特征点匹配模块.

采用本文所提出的中心条纹提取方法和颜色分类方法, 得到调制后结构光图像中心彩色条纹提取及颜色标定效果图如图 3 所示, 从图 3 可知, 本文所述的方法提取宽度为 1 个像素的 De Bruijn 彩色结构光编码条纹经过调制后的中心彩色条纹的正确率大于 99.5%. 在此基础上, 分别采用本文提出的特征点匹配方法和文献[8]所提出的多通道动态规划特征点匹配方法进行解码, 得到效果对比图如图 4 所示, 从图 4 中可以看出, 采用本文提出的方法明显消去了遮挡区域的边界解码误差与检测条纹、条纹颜色标定的误差, 有效地改善了解码精度.

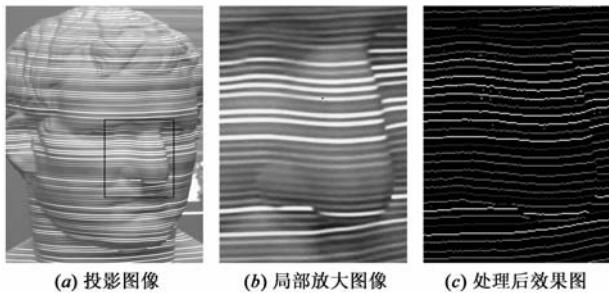


图3 调制后投影图像和中心彩色条纹提取及颜色标定效果图

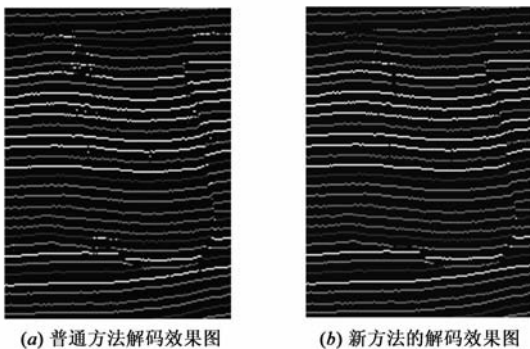


图4 两种彩色结构光解码方法解码效果对比图

本文所提出的三种方法是针对解码过程相互关联顺序执行的三个步骤, 其中基于梯度分析的中心彩色条纹提取方法, 提取得到的中心彩色条纹的误差精度在亚像素级范围内, 完全克服了由于经过待测表面的调制、摄像机和投影机的分辨率、位置等原因造成的摄像机拍摄得到的调制后投影图像中彩色条纹的宽度会

发生变化的缺陷. 基于聚类分析的颜色分类方法, 能克服由于投影机和摄像机的配置、相邻彩色条纹之间的干扰、待测物体对不同颜色条纹的反射及吸收特性不同等原因导致的普通颜色分类方法无法得到高精度的颜色分类结果的缺陷. 该方法适合属于每类颜色的像素点成线性分布的调制后投影图像, 可以有效地消除像素点间的干扰, 提高确定中心彩色条纹颜色的精确性. 基于双梯度多通道动态规划特征点匹配方法充分利用了 De Bruijn 序列的彩色结构光编码图像中局部邻域信息, 提高了特征点匹配精度. 该方法不需要假定全表面单调, 对其连续性也不做严格要求, 还能推广到基于条纹列或条纹边界的解码算法中.

5 结论

针对基于 7 元 3 级迪布鲁英序列的编码方案, 本文提出的一系列解码方法有效地解决了调制后结构光图像中的条纹遮挡问题, 不仅提高了单调区域与遮挡区域的边缘解码精度, 又降低了因检测条纹与条纹颜色标定误差而造成的解码误差, 得到了最佳的匹配结果.

参考文献

- [1] 关丛荣, 于晓洋, 吴海滨, 于嵩, 尹丽萍. RGB 颜色格雷码结构光三维测量技术研究[J]. 仪器仪表学报, 2007, 28(4): 663 - 666.
Guan Congrong, Yu Xiaoyang, Wu Haibin, Yu Song, Yin Liping. RGB color Gray code based structured-light 3D measurement technique[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2007, 28(4): 663 - 666. (in Chinese)
- [2] 吴家勇, 王平江, 陈吉红, 巫孟良. 基于梯度重心法的线结构光中心亚像素提取方法[J]. 中国图像图形学报, 2009, 14(7): 1354 - 1360.
WU Jia-yong, WANG Ping-jiang, CHEN Ji-hong, WU Meng-liang. Method of linear structured light sub-pixel center position extracting based on Gradient barycenter[J]. Journal of Image and Graphics, 2009, 14(7): 1354 - 1360. (in Chinese)
- [3] 张超, 杨华民, 韩成, 于翠红. 基于格雷码结构光的编解码研究[J]. 长春理工大学学报(自然科学版), 2009, 32(4): 365 - 368.
Zhang Chao, Yang Huamin, Han Cheng, Yu Cuihong. Study of coding and decoding based on Gray-code structured light[J]. Journal of Changchun University of Science and Technology (Natural Science Edition), 2009, 32(4): 365 - 368. (in Chinese)
- [4] 李中伟, 王从军, 史玉升. 一种结合梯度锐化和重心法的光条中心提取算法[J]. 中国图像图形学报, 2008, 13(2): 64 - 68.
LI Zhong-wei, WANG Cong-jun, SHI Yu-sheng. An algorithm

- for detecting center of structured light stripe combining gradient sharpening with barycenter method[J]. Journal of Image and Graphics, 2008, 13(2): 64 – 68. (in Chinese)
- [5] 黄俊春, 章炯民. 基于彩色结构光的实时三维重建[J]. 计算机应用与软件, 2009, 26(12): 235 – 237.
Huang Junchun, Zhang Jiongmin. Real-time 3D reconstruction based on color-coded structured light[J]. Computer Applications and Software, 2009, 26(12): 235 – 237. (in Chinese)
- [6] Philipp Fecteler, Peter Eisert, Jurgen Rurainsky. Fast and high resolution 3D face scanning[A]. Proceedings of the 14th International Conference on Image Processing 2007[C]. San Antonio, Texas, USA; IEEE, 2007.
- [7] Rifat Benveniste, Cem Unsalan. A color invariant based binary coded structured light range scanner for shiny objects[A]. International Conference on Pattern Recognition [C]. Istanbul; IEEE, 2010. 798 – 801.
- [8] Li Zhang, Brian Curless, Steven M Seitz. Rapid shape acquisition using color structured light and multi-pass dynamic programming[A]. In Proceedings of the 1st International Symposium on 3D Data Processing, Visualization, and Transmission (3DPVT) [C]. Padova, Italy; IEEE Computer Society Press, 2002. 24 – 36.
- [9] 黄鹏飞, 张道强. 拉普拉斯加权聚类算法[J]. 电子学报, 2008, 36(12A): 50 – 54.
HUANG Peng-fei, ZHANG Dao-qiang. Weighted laplacian clustering algorithm [J]. Acta Electronica Sinica, 2008, 36(12A): 50 – 54. (in Chinese)

- [10] 柳庆武, 胡晓惠, 袁麟. 深空可见光图像中弱小运动目标实时检测[J]. 电子学报, 2009, 37(7): 1614 – 1617.
LIU Qing-wu, HU Xiao-hui, YUAN Lin. Real time detection for dim moving target in visible optical image of deep outer space[J]. Acta Electronica Sinica, 2009, 37(7): 1614 – 1617. (in Chinese)

作者简介



范静涛 男, 1979年8月生, 辽宁省凌源市, 博士生, 主要研究领域为虚拟现实.

E-mail: fanjingtao@cust.edu.cn



韩成 男, 1978年6月生, 吉林省吉林市人, 博士, 主要研究领域为计算机仿真、图像处理、机器视觉.

E-mail: hancheng@cust.edu.cn

张超(通信作者) 男, 1985年1月生, 内蒙古自治区扎兰屯市人, 硕士, 主要研究领域为计算机仿真、图像处理、机器视觉.

E-mail: zhangchao511221@hotmail.com