

彩色结构光系统高低强度条纹的颜色聚类方法

陆军^{1*}, 高乐², 张鑫¹

(1. 哈尔滨工程大学 自动化学院, 哈尔滨 150001; 2. 中国航空无线电电子研究所, 上海 200233)

(*通信作者电子邮箱 lujun0260@sina.com)

摘要:基于 De Bruijn 序列的彩色结构光编码作为空间编码的一种, 具有测量速度快的特点。其中, 彩色条纹的识别是关键问题之一。针对高低强度相间的 4 色 De Bruijn 序列条纹投射模式的特点, 在 $L^*a^*b^*$ 颜色空间中, 通过 L 值的线性二次差分滤波实现了对捕获的彩色结构光高低强度条纹的分割。利用主成分分析和 K 均值聚类思想, 设计了自适应颜色聚类方法, 实现了对 4 种高低强度颜色的识别。实验结果表明, 该方法对环境光等因素具有较好的鲁棒性, 满足彩色结构光视觉测量对精度要求高以及信息提取简单的要求。

关键词:De Bruijn 序列; 条纹分割; K 均值; 颜色聚类; 主成分分析

中图分类号: TP394.41 **文献标志码:** A

Color clustering method for high and low intensity stripes of color structured light system

LU Jun^{1*}, GAO Le², ZHANG Xin¹

(1. College of Automation, Harbin Engineering University, Harbin Heilongjiang 150001, China;

2. Chinese Aeronautical Radio Electronics Research Institute, Shanghai 200233, China)

Abstract: Color coded structured light based on De Bruijn sequence is a kind of spatial code method that is characterized by rapid shape measurement. The recognition of color stripes is a key issue. Considering projected De Bruijn stripe pattern combining four colors with high and low intensity, segmentation of high and low intensity stripes was implemented by using linear filter of second derivative of L channel in $L^*a^*b^*$ color space. Adaptive color clustering was designed by employing Principal Component Analysis (PCA) and K -means clustering. The recognition of four colors with two intensities was finished. The experimental results indicate that the proposed method is robust to factors such as ambient light and it satisfies demand for high precision and simple extraction of information to structured light vision measurement.

Key words: De Bruijn sequence; stripe segmentation; K -means; color clustering; Principal Component Analysis (PCA)

0 引言

结构光三维检测系统一般由投射装置、摄像机、图像处理系统组成。结构光测量的原理是将一幅或多幅编码模式投影到测量场景, 用摄像机捕获场景的投影图像, 然后通过投影模式与解码模式对应点的匹配, 利用三角法得出深度信息, 从而获取三维信息域^[1-4]。结构光三维检测的一个重要问题是投影模式与捕获图像对应点的匹配。为了获得精确的匹配关系, 既要有合理的结构光编码方案, 又要有准确的解码等后期处理方案。

在基于颜色结构光编码的三维重建中, 进行颜色解码之前首先要确定每个要处理像素点的颜色值。文献[5]根据投影条纹特点, 利用色调角进行颜色分类; 文献[6]提出基于 HSI 阈值分色方法, 首先将 RGB 格式转换为 HSI 格式, 然后通过设定固定的阈值对条纹图像进行分色; 文献[7-8]利用 K 均值算法对彩色编码条纹进行分色, 在 RGB 空间中拟合出每种投影颜色的直线, 最终选择 RGB 模型的原点(0,0,0)作为所有直线的公共点, 理论上, 每个点簇都能满足此条件, 然而实验结果显示空间直线不能通过对应点簇的相对中心的位置; 文献[9]提出了一种基于聚类分析的颜色分类方法, 适合于每类颜色的像素点成线性分布的调制后投影图像; 文献[10]针对传统分水岭算法产生严重的过分割问题, 提出了一

种聚类和改进分水岭算法结合的彩色图像分割算法; 文献[11]针对传统彩色编码光栅三维轮廓术中光栅易受到物体表面彩色纹理的干扰, 而造成编码条纹颜色误判和相位误差增大的问题, 提出一种基于互补彩色光栅的三维测量方法, 降低了彩色纹理对测量的影响; 文献[12]采用归一化的 RGB 颜色特征提高对测量方向和光照等因素的不敏感性; 文献[13]比较了 CIELAB、CIELUV 和 L*a*b* 三种彩色空间在彩色图像分割中的应用, 得出 CIELUV 颜色空间在分割效果与处理速度的综合效果上取得较好效果的结论。

考虑条纹编码特点, 设计出一种基于 K 均值直线拟合的自适应调整方法, 具有很好的条纹分色效果, 确定每个要处理像素点的颜色值, 能够产生准确的解码。利用 4 元 2 级的 De Bruijn 序列编码, 引入强度属性产生彩色结构光条纹投射模式。简化 $L^*a^*b^*$ 空间中 L^* 值, 对高低强度条纹进行分割, 分别对高低强度条纹进行分色, 为后续的三维表面重构奠定基础。

1 $L^*a^*b^*$ 空间的高低强度条纹分割

1.1 编码模式的实现

De Bruijn 序列编码是伪随机编码的一种形式, 是具有预先确定, 可重复实现, 具备某种随机特性的编码方式。采用

收稿日期: 2013-03-06; **修回日期:** 2013-05-06。 **基金项目:** 黑龙江省自然科学基金资助项目(F201123); 人力资源和社会保障部留学人员科技活动择优资助项目; 中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(HEUCFX41304)。

作者简介: 陆军(1969-), 男, 黑龙江哈尔滨人, 教授, 博士, 主要研究方向: 计算机视觉、智能控制; 高乐(1987-), 男, 辽宁铁岭人, 硕士, 主要研究方向: 计算机视觉; 张鑫(1988-), 男, 河南周口人, 硕士, 主要研究方向: 机器人与智能控制。

红、绿、蓝及品红四种颜色 ($n = 4$), 选择窗口大小为 $2(m = 2)$, 生成 De Bruijn 序列, 但是此长度远远达不到高分辨率的要求, 因此引入强度及周期属性。

高低强度的选择如图 1 所示, 横轴代表条纹的强度值, 纵轴代表红、绿、蓝及品红在不同强度下 L 的值。当强度值在 0.4 以下时, 各个颜色的 L 值不发生变化; 当强度值在 $[0.4, 0.45]$ 内时, 各个颜色的 L 值不断增加; 当强度值在 $[0.45, 0.5]$ 内时, L 值不发生变化。最后确定条纹低强度的值为 0.4, 因为低强度与高强度之间的差值越大, 越有助于高低强度条纹分割。对于高强度值的选择并不是越高越好, 从图 1 可以看出, 当强度值大于 0.75 以后, 红色和品红的 L 值曲线很接近。对于低强度值选择为 0.4, 高强度分别设置 0.7、0.75、0.8、0.85, 分别对投射的标准模板进行条纹分割, 实验结果表明当强度值为 0.7 和 0.75 时, 产生错误的条纹分割结果; 当强度值为 0.8 或者 0.85 时, 具有良好的分割结果; 如果强度过高大于 0.85 时, 通过相机捕获的蓝绿条纹在分色期间干扰很大。为了使相邻条纹易于识别, 最终设置条纹的高强度值为 0.85。在同一周期, 相邻条纹可以具有相同的色调角 (Hue), 但是具有不同的强度 (Intensity), 因此用有限的 n 种颜色形成了尽可能多的彩色条纹, 并用于投射模式。彩色结构光编码模式如图 2 所示。

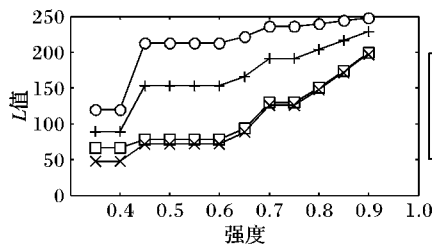


图1 强度选择

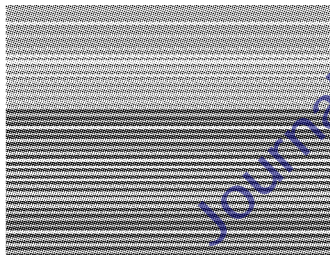


图2 编码基元和编码模式

1.2 图像高低强度条纹分割

Lab 空间中 L 值能很好地描述像素点的亮度信息, 因此通过 L 值二阶差分实现高低强度条纹分割。首先通过 RGB 到 Lab 色彩空间的转换, 求取 L 的值, 并将 L 值归一化到 $[0, 255]$ 。

定义 L 通道:

$$L = 0.2126R + 0.7152G + 0.0722B \quad (1)$$

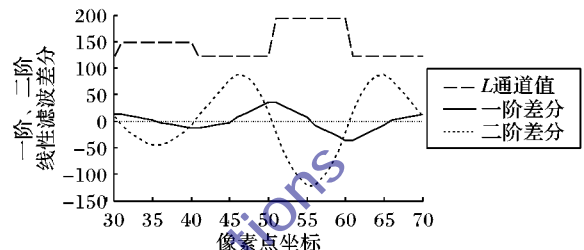
线性滤波差分:

$$f(i) = \sum_{c=1}^{o/2} (L(i+c) - L(i-c)) \quad (2)$$

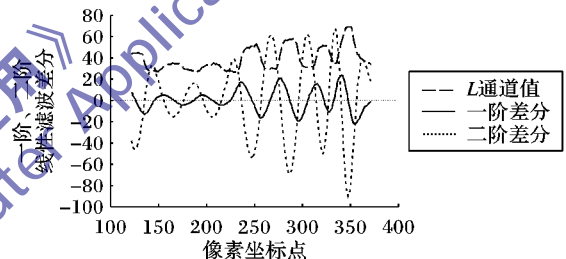
利用编码条纹高低强度相间特点, 对捕获的图片进行条纹分割。利用获得亮度信息进行二阶线性滤波差分, 将彩色条纹进行分割。 f 对应为 o 阶的线性滤波差分, i 代表滤波的像素索引值, 按行扫描。对图像上每个像素点作两次线性滤波差分, 得到 L 通道的线性滤波二次差分。 o 代表滤波阶次, 对于 o 的选择, o 一定要小于条纹像素的宽度。对像素每个点应用线性滤波二次差分, 条纹在边缘处可以得到差分最大值和最小值。

对投射彩色结构光条纹进行高低强度分割, 强度的一阶差分可以用于检测图像的边缘点, 二阶差分的正负用于判断像素点隶属于高强度条纹还是低强度条纹。两次线性滤波差分后, 相间条纹的亮度差增大, 因此只要对二次差分结果选择合适的阈值, 进行彩色条纹分割。阈值选择 0 时, 结果大于等于 0 的部分对应投影的低强度条纹, 小于 0 的结果对应投影的高强度条纹。对部分投射条纹进行高低强度对应, 如图 3 (a) 所示; 对捕获的大卫雕像条纹图像进行线性滤波差分分析, 线性滤波差分结果如图 3 (b) 所示; 大卫图像高低强度条纹分割结果如图 3 (d) 所示。

从分割结果可以看出, 条纹分割算法简单准确, 对环境光、颜色间相互串扰以及物体表面的吸收和反射等因素的影响鲁棒性高, 后续可以分别对高低强度条纹进行条纹分色。



(a) 部分投射条纹L通道差分



(b) 部分捕获大卫图像L通道差分



(c) 截取感兴趣区域



(d) 图像高低强度条纹分割结果

图3 高低强度条纹分割

2 高低强度条纹颜色分类

2.1 颜色自适应分类原理

为了确定每个像素点的颜色, 在 RGB 空间拟合出每种编码条纹颜色的空间直线 $g_c: o_c + x r_c, x \in \mathbf{R}, o_c$ 为空间直线的原点, r_c 为编码条纹颜色直线的方向向量, $c \in \{\text{空间投影颜色}\}$ 。已知编码条纹颜色的数目, 确定了 K 均值聚类的个数, 利用 PCA 和经典 K 均值算法, 确定空间颜色直线的步骤如下:

1) 初始化参数, 包括类数 K 和初始化空间直线 g_c 。初始化 RGB 空间颜色直线为: 从黑色 $(0, 0, 0)$ 分别到红色、绿色、蓝色以及品红 4 条直线。

2) 反复迭代, 直到所有的颜色标号不发生变化;

① 标号: 利用当前分类参数对空间颜色点进行标号。标号的过程为: 求取每个像素点分别到四条空间颜色直线的距离, 选择其中距离的最小值的序号作为当前像素点的标号, 为此时最接近的颜色值。

② 自适应调整: 分类参数自适应调整, 包括空间直线的方

向量 \mathbf{r}_c 和空间原点 \mathbf{o}_c 。

空间颜色直线的方向向量 \mathbf{r}_c 的求取: 首先, 利用具有相同标号的像素点的颜色三通道值, 求出对应点簇的协方差矩阵; 然后, 对协方差矩阵进行特征值分解, 生成一个对角矩阵, 其对角线上的元素是协方差矩阵的特征值; 最后, 最大特征值所对应的特征向量代表了此点簇的颜色点大致变化方向, 便是该点簇空间颜色直线的方向向量 \mathbf{r}_c 。

所有空间点簇的公共原点 \mathbf{o}_c : 利用空间所有点簇结合各自的方向向量 \mathbf{r}_c , 求取所有相同标号的像素点到对应点簇的距离和, 作为目标函数。目标函数相对原点的 R, G, B 分量求导, 令导数为 0, 求出空间点簇的公共偏移量 \mathbf{o}_c , 最后拟合出所有新的空间颜色直线 \mathbf{g}_c 。

求取具有相同标号的像素点 p_i 到新拟合的空间颜色直线 \mathbf{g}_c 的距离, 进行 K 均值聚类分析, 找出每个像素点 p_i 到对应直线距离的最小值, 进行重新标号。反复迭代, 直到每个像素点的颜色值趋于稳定为止。

2.2 基于 PCA 的颜色直线方向向量提取

为了空间每个颜色直线的方向向量 \mathbf{r}_c , 首先求取每个点簇的协方差矩阵。点簇中的每个像素点的 R, G, B 通道值生成样本矩阵为 \mathbf{P} , 每列为一个维度, 协方差矩阵度量的是维度与维度之间的关系。

$$\mathbf{P} = \begin{bmatrix} p_1^R & p_1^G & p_1^B \\ p_2^R & p_2^G & p_2^B \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ p_{N_c}^R & p_{N_c}^G & p_{N_c}^B \end{bmatrix} \quad (3)$$

\mathbf{P} 矩阵的大小为 $N_c \times 3$ 维, N_c 为当前点簇像素点的个数。求取样本矩阵 \mathbf{P} 的协方差矩阵为 \mathbf{C}_c , 大小为 3×3 维。

$$\mathbf{C}_c(R, G, B) = \begin{bmatrix} \text{cov}(R, R) & \text{cov}(R, G) & \text{cov}(R, B) \\ \text{cov}(G, R) & \text{cov}(G, G) & \text{cov}(G, B) \\ \text{cov}(B, R) & \text{cov}(G, G) & \text{cov}(B, B) \end{bmatrix} \quad (4)$$

$$\text{cov}(X, X) = \frac{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})(X_i - \bar{X})}{n - 1} \quad (5)$$

$$\text{cov}(X, Y) = \frac{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})(Y_i - \bar{Y})}{n - 1} \quad (6)$$

其中: \bar{X}, \bar{Y} 为样本 X 与样本 Y 的平均值, $\text{cov}(X, X)$ 和 $\text{cov}(X, Y)$,

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} \sum_{c=1}^C [(r_c^R)^2 + (r_c^G)^2] & - \sum_{c=1}^C r_c^R r_c^G & - \sum_{c=1}^C r_c^R r_c^B \\ - \sum_{c=1}^C r_c^R r_c^G & \sum_{c=1}^C [(r_c^R)^2 + (r_c^B)^2] & - \sum_{c=1}^C r_c^G r_c^B \\ - \sum_{c=1}^C r_c^R r_c^B & - \sum_{c=1}^C r_c^G r_c^B & \sum_{c=1}^C [(r_c^G)^2 + (r_c^B)^2] \end{bmatrix} \quad (10)$$

$$\mathbf{b} = \begin{bmatrix} \sum_{c=1}^C \sum_{i=1}^{N_c} \{p_{ci}^R [(r_c^R)^2 + (r_c^G)^2] - p_{ci}^R r_c^G r_c^R - p_{ci}^B r_c^R r_c^B\} \\ \sum_{c=1}^C \sum_{i=1}^{N_c} \{p_{ci}^G [(r_c^R)^2 + (r_c^B)^2] - p_{ci}^B r_c^B r_c^G - p_{ci}^R r_c^R r_c^G\} \\ \sum_{c=1}^C \sum_{i=1}^{N_c} \{p_{ci}^B [(r_c^G)^2 + (r_c^B)^2] - p_{ci}^G r_c^G r_c^B - p_{ci}^R r_c^R r_c^B\} \end{bmatrix} \quad (11)$$

3 实验结果

分别对高低强度条纹进行聚类分析。大卫雕像的高强度聚类初始样本点如图 4(a) 所示, 低强度聚类初始化样本点为

Y) 分别为变量 X 与 X 以及 X 与 Y 之间的协方差。协方差矩阵 \mathbf{C}_c 的主对角线上的元素是各个维度上的能量, 其他元素是两两维度间的相关性。让保留下的不同维度间的相关性尽可能小, 此时协方差矩阵中非对角线元素基本为零, 主要对协方差矩阵进行特征值分解, 生成一个对角矩阵, 其对角线上是协方差矩阵的特征值。特征值为协方差矩阵的新方差, 同时它也拥有能量, 最大的特征值所对应的能量也最大, 即此特征值所对应的特征向量代表了具有相同标号的点簇大致变化方向, 便是该空间颜色直线的方向向量 \mathbf{r}_c 。

2.3 空间颜色直线方向原点的确定

利用空间所有点簇结合各自的方向向量 \mathbf{r}_c , 最小化所有像素点到对应点簇的距离和, 求出空间点簇的公共偏移量 \mathbf{o}_c 。最后, 拟合出对应点簇新的空间颜色直线 \mathbf{g}_c 。

数据点 p_{ci} 到其相应的空间直线 \mathbf{g}_c 的距离平方和表示如下:

$$D = \sum_{c=1}^C \sum_{i=1}^{N_c} d^2(p_{ci}, \mathbf{g}_c) = \sum_{c=1}^C \sum_{i=1}^{N_c} \|\mathbf{r}_c \times (\mathbf{p}_{ci} - \mathbf{o}_c)\|^2 \quad (7)$$

其中: $C = 4$ 表示在所投影的图案中颜色的数量, N_c 表示当前和颜色 c 具有相同标号的像素点的数量。欲求空间矢量 \mathbf{o}_c , 只需求 D 相对于 \mathbf{o}_c 中各个变量的一阶偏导, 令一阶偏导为 0, 得到三个方程, 方程的形式为 $\mathbf{A} \cdot \mathbf{o} = \mathbf{b}$, 解此非齐次线性方程组可以得到 \mathbf{o}_c 各个分量。

$$\mathbf{r}_c \times (\mathbf{p}_{ci} - \mathbf{o}_c) = \begin{vmatrix} i & j & k \\ r_c^R & r_c^G & r_c^B \\ p_{ci}^R - o_c^R & p_{ci}^G - o_c^G & p_{ci}^B - o_c^B \end{vmatrix} \quad (8)$$

具体的推导过程如下:

设空间公共点 $\mathbf{o}_c: (o_c^R, o_c^G, o_c^B)$, $\mathbf{r}_c: (r_c^R, r_c^G, r_c^B)$, $\mathbf{p}_{ci}: (p_{ci}^R, p_{ci}^G, p_{ci}^B)$, 利用

$$\begin{cases} \frac{\partial D}{\partial o_c^R} = 0 \\ \frac{\partial D}{\partial o_c^G} = 0 \\ \frac{\partial D}{\partial o_c^B} = 0 \end{cases} \quad (9)$$

可以得到矩阵 \mathbf{A} 和 \mathbf{b} , 如下所示:

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} \sum_{c=1}^C [(r_c^R)^2 + (r_c^G)^2] & - \sum_{c=1}^C r_c^R r_c^G & - \sum_{c=1}^C r_c^R r_c^B \\ - \sum_{c=1}^C r_c^R r_c^G & \sum_{c=1}^C [(r_c^R)^2 + (r_c^B)^2] & - \sum_{c=1}^C r_c^G r_c^B \\ - \sum_{c=1}^C r_c^R r_c^B & - \sum_{c=1}^C r_c^G r_c^B & \sum_{c=1}^C [(r_c^G)^2 + (r_c^B)^2] \end{bmatrix} \quad (10)$$

图 4(b)。对于空间任一点的坐标 x, y 及 z , 对应捕获图像中像素点的 R, G 及 B 的值, 按照本文提出的自适应颜色聚类算法步骤, 迭代计算空间直线的公共原点和方向向量, 对图像中每个像素点进行聚类分析。

已知截取的大卫雕像高强度条纹有 4 种颜色, 低强度条纹有 2 种颜色, 那么高强度条纹中 K 均值聚类中的 K 为 4, 低强度条纹为 2, 最终大卫雕像的颜色聚类结果如图 5 所示, 根据 K 均值聚类结果, 利用投射的红、绿、蓝及品红四种颜色, 为每个空间数据点着上对应的颜色。

实验结果显示, 对于高强度条纹进行 K 均值聚类分析, 经过 5 次迭代以后, 已经具有良好的分色结果。而低强度条纹

由于只有 2 种颜色,经过 2 次迭代以后,已经具有良好的分色结果。

图 6 为大卫雕像高强度条纹分色结果,图 7 为大卫雕像

低强度条纹分色结果。图 6(b)和 7(b)为本文自适应颜色聚类方法的结果,图 6(c)和 7(c)为空间颜色直线原点固定不变的非自适应方法的结果。

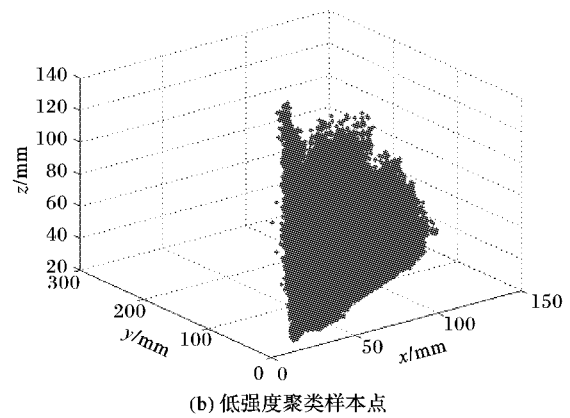
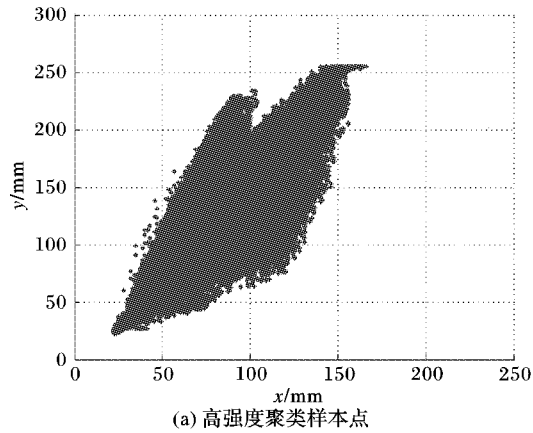


图 4 大卫图像聚类样本点分布

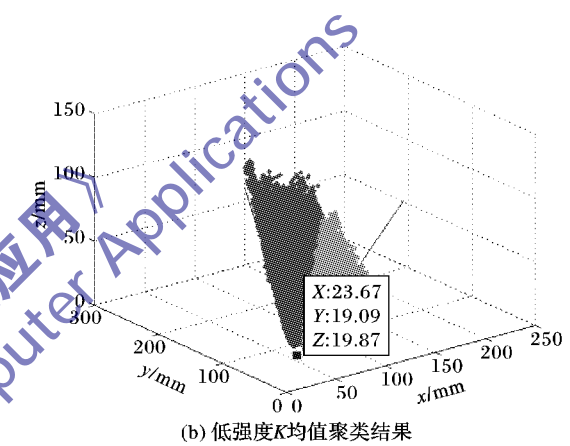
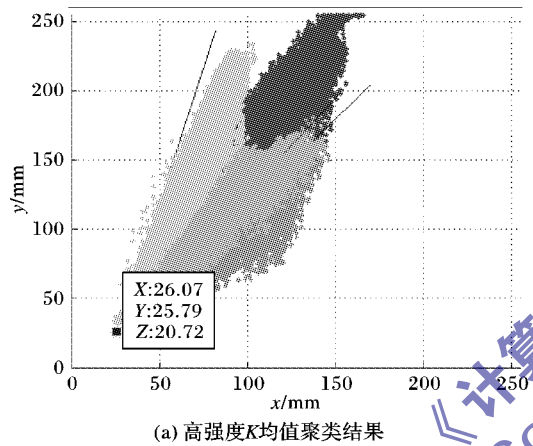


图 5 大卫 K 均值聚类结果

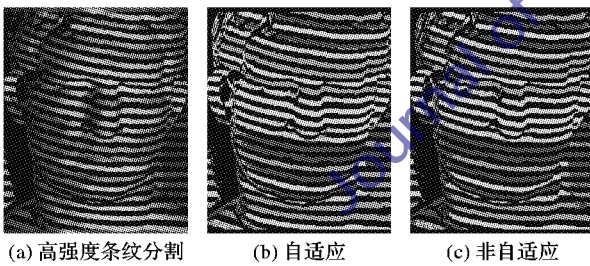


图 6 大卫高强度条纹分色

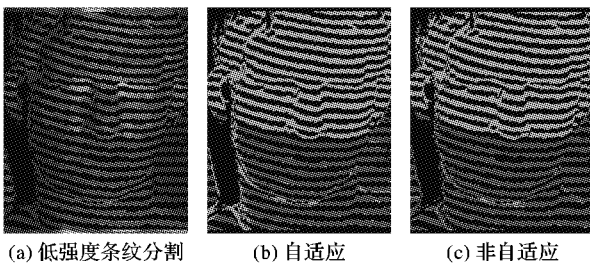


图 7 大卫低强度条纹分色

表 1、2 列出了颜色聚类后,在 RGB 彩色空间模型中捕获的大卫图像中所有像素点的 R、G 及 B 形成的空间点簇的方向向量和原点坐标,方向向量经过归一化形成单位向量。

选择事先确定好 HIS 值的 4 种颜色进行投射,但由于环境光、摄像机非线性等因素的影响,由摄像机捕获后,其 HIS 值会发生变化,通过本文的颜色聚类方法,反复迭代,确定最终颜色对应的直线方程,及直线上的一点和直线的方向矢量。

体现了多干扰的自适应性和鲁棒性。

表 1 大卫的直线方向向量

条纹	颜色	方向向量
高强度条纹	红	$\begin{bmatrix} 0.565 \\ 0.680 \\ 0.467 \end{bmatrix}$
		$\begin{bmatrix} 0.468 \\ 0.818 \\ 0.333 \end{bmatrix}$
		$\begin{bmatrix} 0.273 \\ 0.811 \\ 0.517 \end{bmatrix}$
	品红	$\begin{bmatrix} 0.505 \\ 0.654 \\ 0.563 \end{bmatrix}$
		$\begin{bmatrix} 0.795 \\ 0.527 \\ 0.302 \end{bmatrix}$
		$\begin{bmatrix} 0.382 \\ 0.853 \\ 0.355 \end{bmatrix}$
低强度条纹	红	$\begin{bmatrix} 0.795 \\ 0.527 \\ 0.302 \end{bmatrix}$
	绿	$\begin{bmatrix} 0.382 \\ 0.853 \\ 0.355 \end{bmatrix}$

表 2 大卫的空间原点坐标

条纹	原点坐标
高强调条纹	(26.074 25.786 20.720)
低强调条纹	(23.670 19.090 19.867)

对分割的高低强度条纹的中心位置点提取,在正确分色

和查找邻域的基础上,得到了窗口。利用窗口的唯一性,匹配了投射与捕获图像中的条纹。采用文献[14]的标定方法,依据空间点的三角形测量法,重构成各个对应点的深度信息,从而得到物体表面的三维轮廓,大卫三维点云图如图8所示,三维重构结果如图9所示。

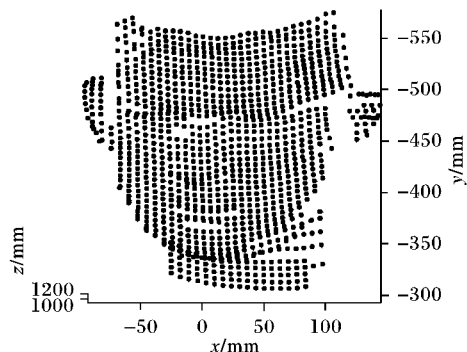


图8 大卫三维点云图

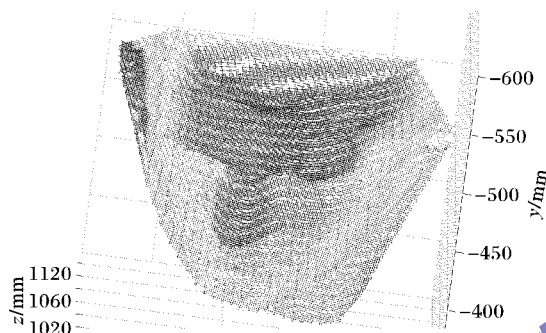


图9 大卫三维重构图

4 结语

本文在基于 De Bruijn 序列的彩色结构光编码模式的基础上,主要阐述了如何对捕获图像进行高低强度条纹分割,以及对条纹分色具有普遍适用的分色算法。使用 4 元 2 级的 De Bruijn 序列,引入高低强度属性,用有限的 4 种颜色编码形成尽可能多条纹。分别对高低强度条纹进行自适应的 K 均值颜色聚类分析,能够适应 RGB 颜色空间中从 0 ~ 255 的任意颜色分类,该方法具有很强的自适应能力。由实验结果可以

看出,设计的高低强度条纹分割以及颜色分类方法简单可行,为实现高精度、高分辨率的三维视觉测量奠定了基础。

参考文献:

- [1] 陈彦军,左旺孟,王宽全,等. 结构光编码方法综述[J]. 小型微型计算机系统, 2010, 31(91): 1-6.
- [2] ZHANG L, CURLESS B, SEITZ S M. Rapid shape acquisition using color structured light and multi-pass dynamic programming [C]// Proceedings of the First International Symposium on 3D Data Processing Visualization and Transmission. Piscataway: IEEE, 2002: 24-36.
- [3] 许丽,陈黎霞,张之江. 结构光系统的周期编码光设计[J]. 光学精密工程, 2010, 18(2): 294-302.
- [4] 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.
- [5] PAGÈS J, SALVI J, COLLEWET C, *et al.* Optimised De Bruijn patterns for one-shot shape acquisition [J]. Image and Computing, 2005, 23(8): 707-720.
- [6] 刘维一,王肇圻,母国光,等. 彩色编码投影光栅三维轮廓术中分色问题的研究[J]. 光学学报, 2001, 21(4): 454-458.
- [7] 魏志强,高兴堂,纪筱鹏. 基于 K 均值算法的彩色编码条纹分色研究[J]. 计算机应用, 2010, 30(2): 67-69.
- [8] 秦钰,荆继武,向继. 基于优化初始类中心点的 k -means 改进算法[J]. 中国科学院研究生院学报, 2007, 24(6): 771-776.
- [9] 范静涛,韩成,张超,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.
- [10] 徐蔚钦,许雪梅,黄帅. 结合聚类与改进分水岭算法的彩色图像分割[J]. 计算机系统应用, 2010, 20(7): 53-57.
- [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): 0212002-1-0212002-7.
- [12] ZHANG X, LI Y F, ZHU L M. Discontinuity-preserving decoding of one-shot shape acquisition using regularized color [J]. Optics and Lasers in Engineering, 2012, 50(10): 1416-1422.
- [13] CORREA-TOME F E, SANCHEZ-YANEZ R E, AYALA-RAMIREZ V. Comparison of perceptual color spaces for natural image segmentation tasks [J]. Optical Engineering, 2011, 50(11): 117203-1-117203-11.
- [14] 陆军,宋成业. 基于格雷码和线移编码的结构光系统标定[J]. 光电子·激光, 2012, 23(6): 1146-1151.
- [7] SHEN L Q, FENG G R, LIU Z, *et al.* Macroblock-level adaptive search range algorithm for motion estimation in multiview video coding [J]. Journal of Electronic Imaging, 2009, 18(3): 1-8.
- [8] SHEN L Q, LIU Z, YAN T, *et al.* View-adaptive motion estimation and disparity estimation for low complexity multiview video coding [J]. IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology, 2010, 20(6): 925-930.
- [9] COMANICIU D, MEER P. Mean shift: a robust application toward feature space analysis [J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2002, 24(5): 603-619.
- [10] HU J-S, JUAN C-W, WANG J-J. A spatial-color mean-shift object tracking algorithm with scale and orientation estimation [J]. Pattern Recognition Letters, 2008, 29(16): 2165-2173.
- [11] 胡波. 基于改进 Mean Shift 算法的实时视频目标跟踪[J]. 光子学报, 2012, 41(4): 461-465.
- [12] FECKER U, KAUP A. H. 264/AVC-compatible coding of dynamic light fields using transposed picture ordering [C]// Proceedings of the 13th European Signal Processing Conference. Piscataway: IEEE, 2005: 1-10.
- [13] OKA S, BANGCHANG P N, FUJII T. Dynamic ray-space coding for FTV [C]// Proceedings of the 2004 3D Image Conference. Piscataway: IEEE, 2004: 139-142.
- [14] EISERT P, STEINBACH E, GIROD B. Automatic reconstruction of stationary 3-D objects from multiple uncalibrated camera views [J]. IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology, 2002, 10(2): 227-261.
- [15] MERKLE P, SMOLIC A, MULLER K, *et al.* Efficient prediction structures for multiview video coding [J]. IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology, 2007, 17(11): 1461-1473.
- [16] 邓智玘,贾克斌,陈锐霖,等. 多视点视频编码中的运动和视差估计快速算法[J]. 北京工业大学学报, 2011, 37(5): 683-689.

(上接第 2299 页)