

格雷编码与相移结合的双目三维重构

王长波, 谢明红

(华侨大学机电及自动化学院, 福建 厦门 361021)

摘 要: 为实现高分辨率快速非接触式双目三维重构, 提出一种格雷编码与相移结合的双目三维重构方法。采用格雷码法将投射空间分为若干个子区域, 投射相移图案, 使各个子区域内的采样点相位在 $[0, 2\pi]$ 范围内变化, 将采样点相位与子区域码叠加, 得到唯一的编码, 如果左右 2 幅图中点的编码符合匹配原则, 则互相匹配成对, 利用三角法原理求出空间点的三维坐标。实验结果表明, 该方法能快速实现三维重构, 误差小于 0.351 mm。

关键词: 三维重构; 结构光; 格雷编码; 相移; 图像匹配; 三角法

Binocular Three-dimension Reconstruction Combined with Gray Coding and Phase-shift

WANG Chang-bo, XIE Ming-hong

(College of Mechanical Engineering and Automation, Huaqiao University, Xiamen 361021, China)

【Abstract】 A binocular three-dimension reconstruction method combined with Gray coding and phase-shift is presented to achieve a fast high-resolution non-contact binocular three-dimension reconstruction. This method combines Gray code with phase-shift, divides the measured space into sub-spaces with Gray code, makes sure the point in the sub-spaces range in $0 \sim 2\pi$ phase by using phase-shift image, and combines the phase with the sub-spaces code which makes all the points into a sole code. It matches the points between the left-image and the right-image, if they conform to the matching principle, then match each other in pairs, and use triangular method principle to get the three-dimension coordinates of space points. Experimental results show that this method can quickly realize three-dimension reconstruction, the error is less than 0.351 mm.

【Key words】 three-dimension reconstruction; structured light; Gray coding; phase-shift; image matching; trigonometry

DOI: 10.3969/j.issn.1000-3428.2013.05.039

1 概述

随着计算机视觉技术的日益发展, 其应用逐渐渗透到产品生产、检测等诸多方面。其中, 在逆向工程中, 该技术被主要应用到计算机视觉的三维数据测量与三维重构^[1]等方面。

三维数据测量可分为自然光测量与结构光测量^[2]。结构光三维视觉测量需由光学投射器(如投影仪等仪器)向被测物体表面投射若干幅经过编码的光栅图形, 然后由经过参数标定的摄像头根据投影序列依次采集图像。最后对所得图像进行分析解码, 由三角方程^[3]求取被测物体表面各点的三维信息。

如何利用编码图案准确地匹配双目系统中左右两图对应点的位置关系, 影响所求三维坐标的精确度。编码方法分为空间编码、时间编码和直接编码^[4]。其中, 时间编码中格雷编码^[5]的解码错误率较低, 但其只能将图像划分为若干

个小区域, 若欲将结果精确到连续的像素单元需投射大量图像, 这将大大降低采集与重构的速度。以上述内容为基础, 本文提出一种格雷编码与相移^[6-7]结合的双目三维重构方法, 对连续的像素单元进行识别编码。

2 双目视觉系统

P 点代表被测物表面的一点。 P 点坐标为 $P(X, Y, Z)$ (以左侧摄像机光心为坐标原点)。左侧图像、右侧图像分别为 2 个摄像头的成像平面。左右光心为两摄像头的光心, 两光心的距离为基线长度 T 。光心与点 P 的连线在成像平面形成点 $p_l(x_l, y_l)$ 、 $p_r(x_r, y_r)$ 。左右图像经过图像校正后 p_l 、 p_r 处于同一水平线上。于是根据三角形相似定理可得:

$$\frac{T - (x_l - x_r) \times d}{T} = \frac{Z - f}{Z} \quad (1)$$

$$\frac{(x_l - c_x) \times d}{X} = \frac{f}{Z} \quad (2)$$

基金项目: 福建省高校产学研合作科技基金资助重大项目(2010H6016)

作者简介: 王长波(1987—), 男, 硕士研究生, 主研方向: 机器视觉; 谢明红, 研究员、博士

收稿日期: 2012-05-18 **修回日期:** 2012-07-11 **E-mail:** xmh@hqu.edu.cn

$$\frac{(y_l - c_y) \times d}{Y} = \frac{f}{Z} \quad (3)$$

其中, d 为图像像素的物理长度; (c_x, c_y) 为光心在图像上的像素点; f 为摄像头的焦距(以上各个参数由摄像机标定求出)。由式(1)~式(3)可得:

$$X = \frac{(x_l - c_x) \times T}{x_l - x_r}$$

$$Y = \frac{(y_l - c_y) \times T}{y_l - y_r}$$

$$Z = \frac{f \times T}{(x_l - x_r) \times d}$$

由以上结果可知, 要求被测物体表面点的空间三维坐标, 只需求出被测点在左右两摄像头采集的图像上对应点的图像坐标, 即图像匹配。为了能将左右两图的对应点相互匹配起来, 本文将用格雷编码与相移相结合的方法为左右 2 幅图像在相同行上的所用像素点编上码值, 这样在 2 幅图中, 拥有相同编码的像素点就是对应的匹配点对。

图 1 是双目立体视觉的系统模型。

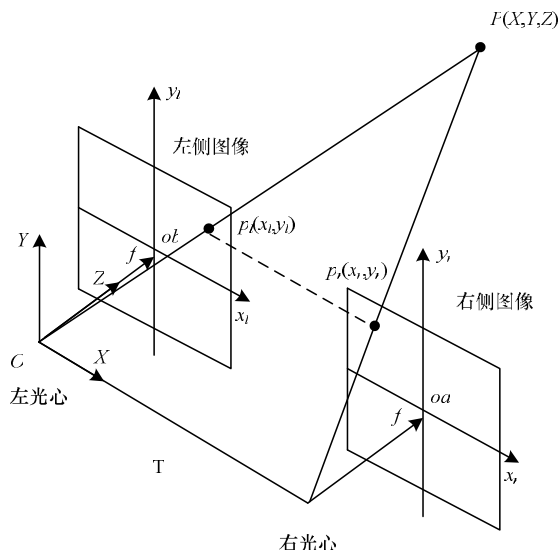


图1 双目视觉系统模型

3 格雷编码与相移技术

3.1 格雷编码与解码

格雷码是时间编码的其中一种。时间编码方法具有易于实现、空间分辨率高、三维测量精度高等优点。但是用传统的格雷编码技术求取完整的三维曲面需投影大量图案, 且效率偏低。为解决这个问题, 将格雷编码与相移技术相结合, 先用格雷编码技术将整幅图分为 2^n 个区域(投射 n 幅光栅条纹图可将原图分成 2^n 个区域), 然后再投射分别相差 $1/4$ 周期的 4 幅相移图案, 将这些子区域再细分到单个像素单元。

3.1.1 格雷码编码

图 2 所示格雷光栅图由黑白相间的条纹周期组成, 为投射的 n 幅格雷编码图像的其中之一。

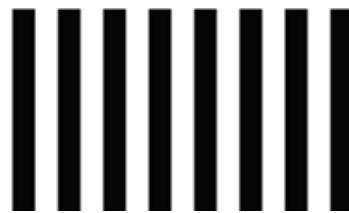


图2 格雷码光栅图

每幅图所包含的周期数为 2^{n-1} , 其中, n 为图像的第几幅。即第 1 幅的周期为 $2^0=1$, 第 n 幅为 2^{n-1} 个周期。编码时黑白条纹分别与二进制码的 0、1 相对应。于是物体上的点经由所有格雷码图像照射后被编上相应的格雷码。

图 3 上的实线为物体上的某条线在 6 幅采集的图中的光照情况。

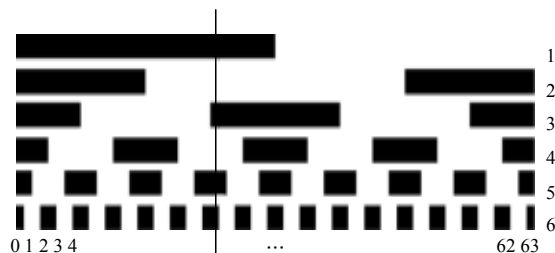


图3 时间序列条纹图

由图 3 可知, 在图 1 中是黑色, 被赋予 0; 在图 2 中是白色, 被赋予 1。以此类推, 这条线上的点的格雷码值为 010100。用此法将格雷码光照射后拍出的整幅图像编码, 可以将图像分成 2^n 个区域, 每个子区域内的格雷码值是一样的。投射 6 幅格雷码光栅图可将采集的图像分成 64 个区域, 但是未经过解码的 64 个子区域的格雷码值相邻区域之间的值不连续, 必须将格雷码值解码转换成 0~63 的连续二进制值。

3.1.2 格雷解码

根据二进制码与格雷码的规律, 从格雷码 G 到二进制码 B 的转换步骤, 即格雷解码过程^[8]如图 4 所示。

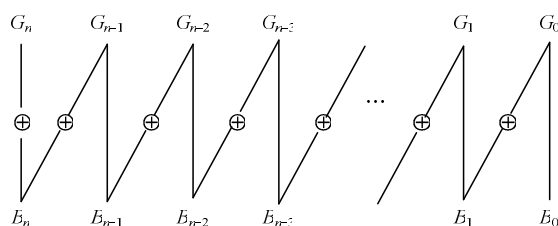


图4 格雷解码过程

格雷码的最高位不变赋值给二进制码最高位即 $B_n = G_n$, 再将 B_n 位与 G_{n-1} 位进行异或运算后的值赋值给 B_{n-1} 位, 以此类推得:

$$B_n = G_n$$

$$B_{n-1} = B_n \oplus G_{n-1}$$

$$B_{n-2} = B_{n-1} \oplus G_{n-2}$$

$$\dots$$

$$B_0 = B_1 \oplus G_0$$

(4)

如格雷码 $G=010100$ ，二进制转换后的值为 $B=011000=24$ 。图 3 中将采集图像所有像素点的格雷码都二进制解码后，图像被分为 64 个区域，区域的值由 0~63 连续变化，然后再用相移技术对这些区域进行连续划分，使每行上的不同像素点区域有一个唯一编码。

3.2 相移技术

3.2.1 光栅投射

相移技术是向被测物表面投射一系列正弦周期变化的光栅，本文采用 4 步相移技术。相移编码如图 5 所示。

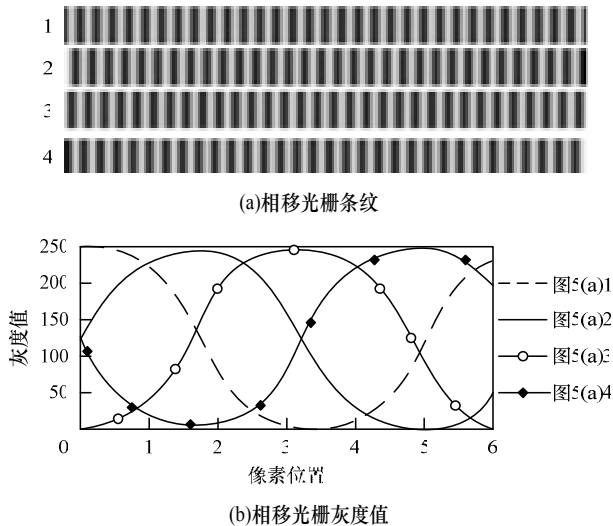


图 5 相移编码

投射的 4 张图案如图 5(a)所示，各点的灰度值由 0~255 呈周期性变化，其灰度值大小由像素点的位置决定，呈正弦函数关系，如图 5(b)所示。第 1 幅相移图~第 4 幅相移图在图案周期的垂直方向上分别相差 1/4 个周期。灰度值与投射图像像素位置的关系如下：

$$I = A + B \sin(\psi_n + \frac{2\pi \times x}{T}) \quad (5)$$

其中， I 为图像上每一行横坐标为 x 处的灰度值； A 代表生成正弦光栅消除负灰度的补偿值，本文取 127.5； B 为正弦光栅的幅值，本文取 127.5； ψ_n 代表第 n 幅图的初始相位 $\psi_n = \pi/2 \times (n-1)$ ， $n=1, 2, \dots, 4$ ； T 为相移周期， T 等于格雷码子区域的宽度，格雷码子区域宽度与相移周期相等才能对每个像素点赋相位值。

3.2.2 相位求取

将采集图像同一个采样点对应的 4 幅图的灰度值 $I_1 \sim I_4$ 代入下式，求出该采样点的相位 f ：

$$f(x, y) = \arctan \frac{I_4 - I_2}{I_1 - I_3}, -\pi/2 < f < \pi/2 \quad (6)$$

由以上计算结果可知，相位之解只会落在 $[-\pi/2, \pi/2]$ 之间变化，但是正弦函数的周期是 2π ，周期内像素点无法与相位值一一对应，因此，必须考虑 $(I_4 - I_2)/(I_1 - I_3)$ 分子与分母的正负号，将相位解由 $[-\pi/2, \pi/2]$ 拓展到 $[0, 2\pi]$ 。拓展法则由分子与分母的符号决定，相位修正关系如表 1 所示。

表 1 相位修正关系

$I_4 - I_2$	$I_1 - I_3$	修正后相位值	相位值范围
0	+	0	0
+	+	f	$0 \sim \pi/2$
+	0	$\pi/2$	$\pi/2$
+	-	$f + \pi$	$\pi/2 \sim \pi$
0	-	π	π
-	-	$f + \pi$	$\pi \sim 3\pi/2$
-	0	$3\pi/2$	$3\pi/2$
-	+	$f + 2\pi$	$3\pi/2 \sim 2\pi$

根据表 1 得到修正相位后，将其与解码周期(即格雷码区域值)相叠加，获得每个采样点的绝对相位值称绝对相位，公式如下：

$$\omega = 2k\pi + F \quad (7)$$

其中， ω 为绝对相位； F 为修正后的相位值； k 为格雷码值。叠加之后的绝对相位理想情况下在 $0 \sim 2(k+1)\pi$ 线性递增。

3.3 格雷周期错位校正

投射相移光栅的周期与格雷码子区域的宽度相等，在理想状态下，采集图像上的相移周期与格雷子区域也应该宽度相等，且周期对应。但是由于解码格雷码图像时二值化阈值的选取以及环境光、噪声等因素的影响，限制了格雷码周期与相移周期的一致性，在周期的边缘会产生错位，这将使重建结果在每个周期边缘处产生误差。因此，有必要对其中一种周期进行校正使之与另一种周期相对应。

由实验知强度图像中相位突变位置(相移周期由 $0 \sim 2\pi$ 均匀变化，再由 2π 突变为 0，突变点即所谓的相位突变位置)较格雷码边缘位置准确，因此，可以通过调节格雷码解码周期位置来消除周期错位的问题。解决方法为：获取一个相移周期中所有像素点的格雷码值，即相邻 2 个相位突变位置之间所有像素点的格雷码值，然后求出这组格雷码值中的众数(出现次数最多的数为众数)，然后将整组像素点的格雷码值赋于此众数的值，绝对相位的求取与周期校正都是在单行上操作。此方法简单高效，校正后可以使绝对相位在周期边缘处的误差被消除。

3.4 亚像素匹配

图像的匹配即在右图中的同一行上找出与左图上的点绝对相位相等的点。由于在拍摄中 2 个摄像头有一定距离和角度，再加上环境光、噪声等因素的影响。在像素级别上，要在右图找出与左图上的像素点绝对相位相等的像素点是不可能的。因为绝对相位值虽然与像素位置呈线性递增的关系，但是像素点是离散的，所以左图中某点的绝对相位在右图中很可能是落在 2 个相邻的像素点之间。线性插值示意图如图 6 所示。

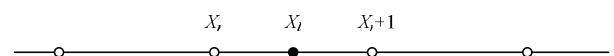


图 6 线性插值示意图

X_i 为左图上的待匹配点， X_r 与 X_{r+1} 为右图上相邻的 2 点， X_i 的绝对相位落在 X_r 与 X_{r+1} 绝对相位值之间，即

$\omega(X_r) \leq \omega(X_l) \leq \omega(X_r+1)$, 由于相位值与像素点成线性关系, 因此根据比例关系在像素 X_r 与 X_r+1 之间插值, 求取 X_l 的在右图中的亚像素匹配点 X_P :

$$X_P = X_r + \frac{\omega(X_l) - \omega(X_r)}{\omega(X_r+1) - \omega(X_r)}, \omega(X_r+1) \neq \omega(X_r)$$

$$X_P = X_r, \omega(X_r+1) = \omega(X_r) \quad (8)$$

在经过插值匹配后, 可将左图上的点与右图上的亚像素点相互匹配^[9], 然后再用三角法原则求出匹配点的空间坐标, 重构立体模型。

3.5 适用范围

在对格雷码解码的过程中, 需对图像做阈值处理, 若阈值化后的黑白条纹对比投影仪光较吻合, 则实验结果效果较佳。但是在实际实验过程中, 实验结果往往会受到被测物表面颜色和镜面反射系数的干扰。被测物表面镜面反射系数较高, 将使阈值化后的图像原本该呈现黑色条纹的地方出现白色反光光斑, 此处的格雷码将出现错误, 进而影响匹配结果。另外, 由于本文采用单一阈值处理, 因此若被测物表面颜色变化较明显, 可能使阈值化后的图像某些该呈现白色条纹的地方表现为黑色。因此, 采用本文方法进行三维重构的一般为表面为单一颜色的镜面反射系数较小的物体, 或者在表面条件较差的被测物工件表面喷上显影剂亦可使实验效果达到预期要求。

4 实验结果及分析

4.1 实验器材与重建步骤

明基 MP515 投影仪 1 台、维视 MV-1303UM 工业摄像头 2 个、PC 机 1 台。图 7 显示了利用格雷编码与相移相结合技术测量三维空间点坐标实验步骤。

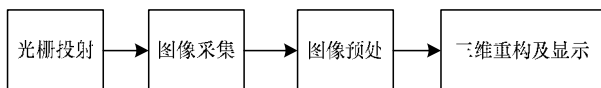


图 7 三维空间点坐标实验步骤

三维空间点坐标实验步骤如下:

(1) 结构光的投射

依时间序列控制投影仪向被测物体的表面依次投射 6 幅格雷编码图案和 4 幅相差四分之一周期的相移图案。格雷码图案的投射为了将被测区域划分成若干子区域, 图案数量的多少并无硬性规定。但是投射图案过少, 子区域区间大, 将对进一步的连续划分精度造成影响; 投射图案多, 能将子区域分成小区间, 便于连续划分, 但是由于光学衍射定理, 投射的光栅中白条纹会向黑条纹衍射; 如果划分的区域过小, 黑条纹在被白条纹衍射后条纹宽度将非常窄, 不利于图像采集与分析, 对后续结果分析将造成影响。所以, 投射图案的数量也不宜过多, 本文采用的投影仪分辨率为 1280×720 像素, 经过反复实验, 在投射 6 幅格雷码图案可将图像划分 64 个宽度为 20 像素的区域, 实验结果效果较佳。

(2) 图像采集

图像的采集与步骤(1)的投射时序相对应, 用摄像头依次对 10 个投射场景采集 10 幅对应的图案。在 C++ 程序语言中, 可以用如下的数据结构来表示所创建图像的数据结构:

```

typedef struct _IpImage
{
    Int nChannels; // 图像的通道数
    Int depth; // 图像的深度可以是 8 位、16 位、32 位、64 位
    Int width; // 图像的宽度
    Int height; // 图像的高度
    Char* imageData; // 存储图像的数据, 包括颜色值、灰度值等
    Int widthStep; // 图像每一行所用的字节数, 是 8 的倍数, 不足 // 的补 0
    Int origin; // 用于设置坐标原点位于左上角还是左小角
    Int dataOrder; // 指明数据是将像素点不同通道的值的排列 // 方式
}
  
```

(3) 图像预处理

由于光照环境等因素的影响, 采集的图像上有许多噪声, 这些噪声将使实验结果有许多离散的点, 因此首先对采集图像平滑滤波处理^[10]。平滑处理有中值滤波、高斯模糊滤波、双边滤波模糊算法等方法。其中, 高斯滤波能在保留信号的条件减少噪声, 本文实验对边缘没有较高的要求, 因此, 选择使用高斯滤波平滑处理来去除噪声。因为在格雷码编码解码的过程中要求图案只含有黑(灰度值 0)白(灰度值 255)条纹, 但实际采集的图像上像素的点灰度在 1~255 之间变化, 所以必须设定一个阈值^[11]作为一个分水岭。使大于这个阈值的所有像素点的灰度值全部为 255; 小于阈值的点的灰度值为 0。阈值的选择需根据环境及光照选择, 阈值设定大了, 本来应为白条纹的区域被设为黑条纹; 阈值设定小了本来应为黑条纹的区域被设为白条纹。因此, 本文在多次重复的基础上选择灰度值 90 作为图像二值化的阈值。

(4) 三维重构及显示

经过预处理的图像的灰度值只有 255 与 0。于是就可以对图案进行格雷解码划分子区域, 然后再求取各像素的相位角, 将每个像素编码配对, 最后用三角定理求出空间点的三维坐标。模型的显示可以采用图形程序接口 OpenGL^[12]。本文先将采集的离散点云集用 OpenGL 显示出来, 然后再将这些点云数据进行三角片化处理显示出整体面模型。这样既可以精简数据, 又可以通过对比对实验过程及结果有直观的认识。

4.2 误差分析

通过以上的实验步骤, 实现对一块在平面铁皮上冲压印有“方正电脑”4 个字的主机箱盖的三维数据的求取与重构, 主要是提取铁片上几个向内凹的字的尺寸信息, 然后

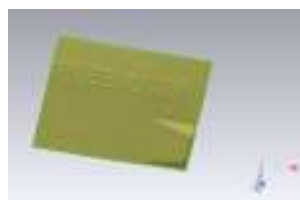
通过与实际测量的尺寸对比, 算出本文方法求取的数据与实际尺寸的误差。实验结果如图 8 所示。表 2 为第 2 个字“正”字的字宽、字高以及字凹槽的深度与实际尺寸的对比。



(a)被测物原型



(b)光栅照射图



(c)三维模型效果图

图 8 实验结果

表 2 “正”字实际与测量尺寸对比

分类	实际尺寸	测量尺寸	误差/mm
“正”字高	41.00	40.649	0.351
“正”字宽	38.65	38.746	0.096
字凹槽深度	0.38	0.326	0.054

通过对以上误差分析, 可知由本文方法测量的尺寸与物体的实际尺寸的误差都能精确到 0.351 mm 以下。

5 结束语

本文提出一种格雷编码与相移结合的双目三维重构方法。为了实现左右图像点的亚像素匹配, 通过采集一系列的格雷码图像, 将被测场景划分为 64 个区域, 采用 4 步相移法将每个区域细分到像素级, 使用亚像素插值将左右图

像的点匹配成对, 对匹配后的点对利用三角法原理进行计算。实验结果表明了该方法的可行性。然而, 该方法在测量表面颜色为非单一色的物体时表现较差, 今后将着力于扩大其适用范围并提高测量的精度。

参考文献

- [1] Zollner F, Matusевич V, Kowarschik R. 3D Measurement by Stereophotogrammetry[J]. Proceedings of SPIE, 2003, 5144: 311-314.
- [2] 吕乃光, 孙 鹏, 姜小平, 等. 结构光三维视觉测量关键技术的研究[J]. 北京信息科技大学学报, 2010, 25(1): 1-5.
- [3] 马颂德, 张正友. 计算机视觉——计算理论与算法基础[M]. 北京: 科学出版社, 1998.
- [4] 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(9): 1856-1863.
- [5] Salvi J. Pattern Codification Strategies in Structured Light Systems[J]. Pattern Recognition, 2004, 37(4): 827-849.
- [6] Jia Peirong, Jonathan K, Chad E. Two-step Triangular-pattern Phase-shifting Method for Three-dimensional Object-shape Measurement[J]. Optical Engineering, 2007, 46(8).
- [7] Huang Peisen, Zhang Song, Chiang Fu-Pen. Trapezoidal Phase-shifting Method for 3D Shape Measurement[J]. Proceedings of SPIE, 2004, 5606: 142-152.
- [8] 丁 强, 董万钧. 一种格雷码与二进制码转换的新方法[J]. 水利水文自动化, 2001, (1): 21-22.
- [9] 张吴明. 投影栅三维形面测量中亚像素匹配算法[J]. 清华大学学报: 自然科学版, 2008, 48(3): 412-414.
- [10] 李俊生. 一种图像平滑处理方法的空域算法与频域分析[J]. 常州工学院学报, 2004, 17(2): 30-33.
- [11] 董立菊, 于 戈. 一种有效的图像二值化方法[J]. 东北大学学报, 2004, 25(12): 1149-1152.
- [12] Richard S, Wright J. OpenGL 超级宝典[M]. 张 琪, 付 飞, 译. 4 版. 北京: 人民邮电出版社, 2010.

编辑 刘 冰

(上接第 177 页)

- [6] 赵旭寰, 王振会, 肖稳安, 等. 神经网络在雷暴预报中应用初步研究[J]. 热带气象学报, 2009, 25(3): 357-360.
- [7] Chawla N V, Japkowicz N, Kolcz A. Editorial: Special Issue on Learning from Imbalanced Data Sets[J]. SIGKDD Explorations, 2004, 6(1): 1-6.
- [8] Foster P, Tom F. Robust Classification for Imprecise Environments[J]. Machine Learning, 2001, 42(3): 203-231.
- [9] He Haibo, Edwardo A. Learning from Imbalanced Data[J].

IEEE Transactions on Knowledge and Data Engineering, 2009, 21(9): 1263-1284.

- [10] 李 昕, 郑 宇, 江芳泽. 用改进的 RPCL 算法提取聚类的最佳数目[J]. 上海大学学报, 1999, 5(5): 409-413.
- [11] 吴晓蓉. K-均值聚类算法初始中心选取相关问题的研究[D]. 长沙: 湖南大学, 2008.
- [12] Lin Chihjen. LIBSVM[EB/OL]. (2010-11-21). <http://www.esie.ntu.edu.tw/~cjlin/libsvm/index.html>.

编辑 刘 冰

