

文章编号 1004-924X(2013)04-1069-10

符号 M 阵列结构光的解码

陆 军^{1*}, 李积江¹, 黄春明²

(1. 哈尔滨工程大学 自动化学院, 黑龙江 哈尔滨 150001; 2. 瞬联软件科技(北京)有限公司, 北京 100044)

摘要:在大尺寸 M 阵列编码模式的基础上, 研究如何对捕获图像进行解码, 进而实现了匹配和三维重构。选择容易识别和区分的矩形块、圆圈和圆盘作为 M 阵列符号生成投射模式, 对捕获的 M 阵列编码图像进行解码研究。在充分考虑投射模式、符号特征、投射和捕获环境、符号畸变等因素的影响后, 确定解码方案。在对捕获图像进行预处理的基础上, 采用符号特征识别来确定符号类别, 计算确定矩形块方向, 并以最邻近矩形块方向为基准, 得到圆圈、圆盘方向, 确定各个符号的下邻域和右邻域。遍历所有符号, 获得解码后的 M 阵列, 利用窗口的唯一性, 确定各个窗口在投射模式中的位置, 进而确定每个匹配点的位置, 生成匹配点坐标矩阵。最后, 利用三角测量法得到深度信息, 实现了物体三维表面重构。

关键词:解码; 三维测量; 大尺寸 M 阵列; 单色编码; 符号阵列

中图分类号: TN919.8; TP391 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20132104.1069

Decoding of structured light based on symbol M-array

LU Jun¹, LI Ji-jiang¹, HUANG Chun-ming²

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

2. CIE Net Technologies(Beijing), Beijing 100044, China)

* Corresponding author, E-mail: lujun0260@sina.com

Abstract: On the basis of a previous encoding pattern with a large size M-array, this paper researches how to decode a captured image and then to implement the image matching and image reconstruction. The rectangular block, circle and the disc are chosen as M-array symbols that are easily indentified and distinguished to encode the projecting pattern, then, they are used to study the decoding method for the captured encoding M-array image. By considering projection patterns, symbol features, environments, symbol distortion and other factors fully, the decoding scheme is determined. After preprocessing the captured image, the symbol feature recognition is adopted to recognize the classification of symbols, calculate the directions of angular blocks, and to obtain the directions of circle and disc and determine the nether neighborhood and the right neighbor of symbols by an adjacent angular block as the reference. Furthermore, the decoded M-array is gotten by traversing all symbols. According to the window uniqueness, the position of each window in the projection pattern is determined, then the location of each match point is found and a coordinate matrix of matched points is generated. Finally, the depth information of 3D surface is obtained by using triangulation method and the reconstruction

收稿日期: 2012-12-27; 修订日期: 2013-01-30.

基金项目: 黑龙江省自然科学基金资助项目(No. 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

of a 3D surface is finished.

Key words: decoding; 3D measurement; large size M-array; monochromatic encoding; symbol array

1 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,例如光栅、光点、光缝、网格或斑纹等投影到测量场景,用摄像机捕获场景的投影图像,然后通过对比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。结构光也被认为是最可靠的三维测量技术之一^[1-3]。

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。目前有多种结构光编码方法,大致可以分为:时间编码,直接编码,空间邻域编码^[1]。时间编码需要投射多幅图案,仅适用于静态场景;直接编码需要投射一到两幅图案,由于受测量场景和测量设备影响较大,应用有限,且不适用于动态场景;空间邻域编码使用单帧投射模式,受场景等影响较小,且适合动态场景^[4-5]。空间邻域编码可分为非正式编码模式、伪随机序列编码模式和伪随机阵列编码模式 3 种。针对非正式编码的研究,Koninckx 和 VanGool^[6]提出一种自适应方法,可随场景噪声程度和颜色等自动调节基图案中的条纹宽度和密度,具有较强的编码能力,但此方法需要预知一部分场景,且解码困难。对于伪随机序列编码的研究,Zhang 等^[7]采用了基于 DeBruijn 序列^[8]的编码方法,投影图案是使用 5 色 3 次 DeBruijn 序列产生 125 条垂直条纹投射到场景,由于采用彩色光编码,受到光干扰的因素增多,空间分辨率不高。关于伪随机阵列的研究,Hiroshi 等^[9]采用对角线法,将伪随机序列扩展成伪随机阵列。但是,在三元域中,即使使用九阶的本原多项式,利用对角线法得到的 M 阵列的尺寸仍然无法达到高分辨率的要求。因此,为得到高分辨率测量的大尺寸 M 阵列,研究了一种大尺寸 M 阵列生成算法。本文在之前算法研究的基础上^[16],着重考虑如何将大尺寸 M 阵列应用于结构光编码,尤其是如何对捕获图像

进行解码、进而进行匹配和三维重构。

2 大尺寸符号 M 阵列编码模式

基于伪随机原理,产生大尺寸 M 阵列,然后用符号表示 M 阵列,生成投影模式。利用 M 阵列编码的窗口特性,使得场景的每一采样点可以被唯一识别,从而能够解决三维物体表面重构中匹配点确定的难题。

2.1 M 阵列编码原理

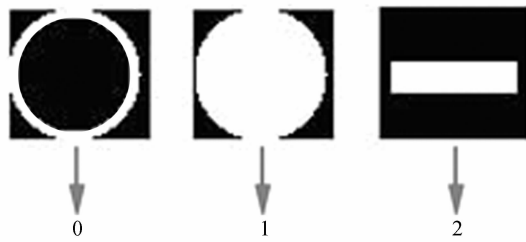
M 阵列编码是伪随机编码的一种形式,具有预先确定,可重复实现,具备某种随机特性的编码方式^[10]。对于一个窗口尺寸为 $r \times v$ 的 q 元 $m \times n$ 的 M 阵列,它的定义是:在 q 元 $m \times n$ 的阵列中,任意一个 $r \times v$ 的子矩阵在阵列中仅出现一次。若用一个子矩阵代表一个窗口,则 M 阵列窗口是唯一确定的,即当 $k_1 \times k_2$ 的编码窗口沿 $n_1 \times n_2$ 阵列滑动时,透过该窗口看到的任一 $k_1 \times k_2$ 子阵列都不完全相同。基于这种唯一性,只需知道窗口中的子阵列的元素,就能够确定该子阵列在整个阵列中的位置。

M 阵列尺寸越大,单位投射面积的符号就越多,测量分辨率就越高。如果仅简单地从对角线法得到的 M 阵列中抽取几个子阵列拼接在一起,并不能保证在拼缝处的窗口具有码字唯一性,生成的阵列就不是严格的 M 阵列,所以我们在之前研究了一种可以生成大尺寸严格的 M 阵列的算法^[16]。选取一个 9 阶的本原多项式 $h(x) = x^9 + x^7 + x^5 + 1$,利用线性反馈移位寄存器的工作原理,产生一个长度为 $n = 3^9 - 1 = 19682$ 的伪随机序列。根据产生伪随机阵列的对角线法则,编制一个 $n_1 \times n_2 = 26 \times 757$ 的伪随机 M 阵列,利用我们的拼接算法可生成一个尺寸为 48×52 的大尺寸严格的 M 阵列,并用于投射模式。

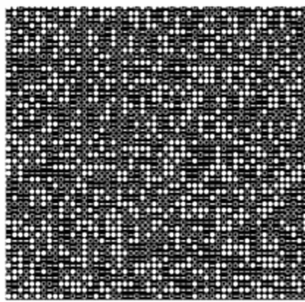
2.2 编码模式的实现

M 阵列的实现模式有多种,如彩色伪随机空间编码法,彩色谱编码法,但是彩色编码模式,容易受光照等因素的影响,使得颜色出现偏差,从而增大了解码阶段的误差。单色光编码鲁棒性更好,而且单色光的投射装置实现简单,故我们采用

单色光模式。符号的选取对解码很关键,在摄像机拍摄可能畸变的符号图像后,要对其进行识别,就要求符号的可识别性较佳。考虑以上因素,选择以下 3 种几何基元符号进行编码,如图 1(a)所示。



(a)



(b)

图 1 编码基元和编码模式

Fig. 1 Encoding primitives and pattern

根据测量的需要,利用大尺寸 M 阵列生成算法生成 1 个尺寸为 48×52 的阵列,然后用圆环,圆盘,矩形块 3 个几何基元分别代替阵列中的“0”,“1”,“2”,用黑色作为整个模板的背景色,如图 1(b)所示,可得对应的符号 M 阵列编码模式。图 2 是实验对象在投射前和投射后的图像。

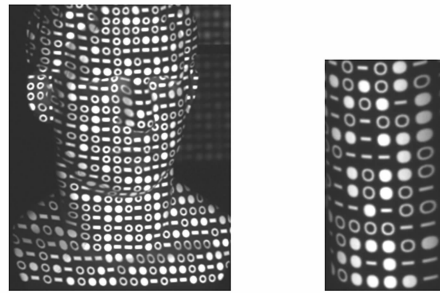


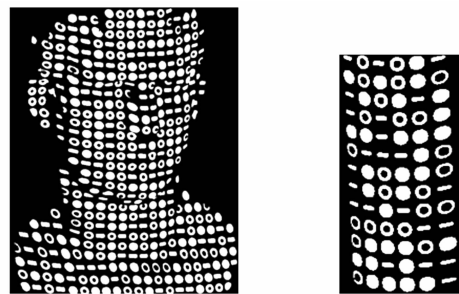
图 2 投射对象投射前后

Fig. 2 Before and after projectings

3 捕获图像解码

3.1 图像预处理

摄像机采集到的是一幅符号编码二维图像,在图像采集过程中,背景信息和噪声等干扰使得编码图案变得模糊,要把图像中的图案分离出来,首先要对图像进行处理^[12-15]。对摄像机所采集的符号图像,采用背景差分的方法获得感兴趣的区域之后,使用高帽滤波与方形形态结构元素去除图像中的不均匀亮度,增强图像加对比度,将图像分区域二值化,形态学处理,阈值分割滤除,区块拼接等方法进行处理,得到如图 3 所示结果。



(a) 雕像

(b) 圆柱

(a) Sculpture

(b) Cylinder

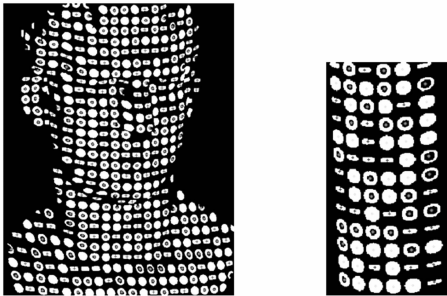
图 3 图像处理后结果

Fig. 3 Preprocessed images

3.2 符号识别

首先利用区域增长算法把各符号所在区域从捕获图像中提取出来,其中去掉像素点个数较小的噪声区域。其次从得到的区域中识别出圆环、圆盘和矩形。因为圆环中心点所处位置的背景色是黑色,先利用这个信息把圆环区分出来,并用红色星号(*)标记在圆环的中心上。对于圆盘和矩

形块,第一种方法,在矩形区域和圆形区域具有相同边界框时,它们的面积、周长是不等的。利用区域的面积、周长参数与边界框的对应参数进行比较,可以区分矩形区域与圆形区域。第二种方法,如果区域是细长形的,通常将最小二阶矩轴定义为物体的方向。可以用长轴长和短轴长的比值来作为两个区域的判据。在这里,我们采用第二种方法来识别。利用长轴长度与短轴长度的比值不同可以完全区分圆盘和矩形块。并且用蓝色加号(+)把矩形块的中心标出来,用绿色点号(·)把圆盘的中心标出来,这样就把 3 种符号识别出来了,识别结果如图 4 所示。



(a) 雕像 (a) Sculpture (b) 圆柱 (b) Cylinder

图 4 符号识别结果

Fig. 4 Results of symbol recognition

3.3 邻域寻找

在编码模式中,采用了 3 种编码符号,在编码过程中重复使用这些符号,仅凭借符号的码字是无法确定某个符号在投射模式中的位置。但窗口的码字是唯一的,如图 5 所示。凭借窗口码字能确定窗口在投射模式中唯一位置,可以进一步确定各符号点的位置。然后求这个窗口的码字,并与预先设计的编码模式中的窗口进行匹配,就可提取该符号在编码模式中的行和列坐标,从而实现三维重构。

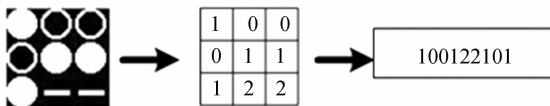


图 5 码字窗口示意图

Fig. 5 Code word

为组成一个的窗口,对任意一个符号,通过寻找每个符号的右邻域和左邻域,从而得到每个符号的 3×3 邻域的其他 8 个符号。

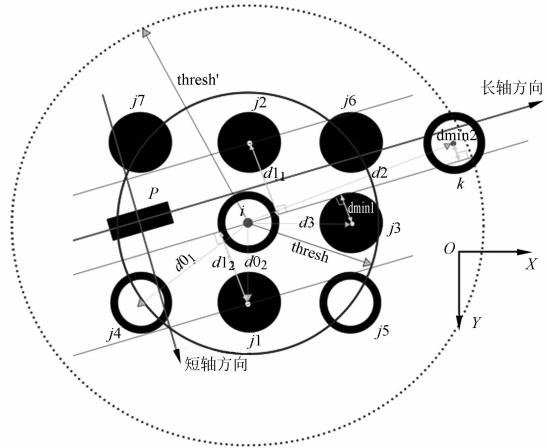


图 6 右邻域查找原理图

Fig. 6 Schematic diagram of finding right neighborhood

首先以确定图 6 符号的右邻域为例说明右邻域的寻找过程。对于圆环或圆饼,由于其各方向的半径基本相等,长轴方向难以准确确定,因此,选择距离它们最近的矩形的长轴方向作为圆环和圆饼的方向。图 6 中矩形 P 的长轴方向被选为圆环 i 的主轴方向。首先确定右邻域的查找范围,以圆环 i 的中心为圆心,以阈值 $thresh$ 为半径,并将在圆环 i 的右侧的符号作为圆环 i 的候选右邻域。如图 6 所示,符号 j_1, j_2, j_3 为圆环 i 的候选右邻域。符号 i 右邻域应该在符号 j_1, j_2, j_3 中产生。

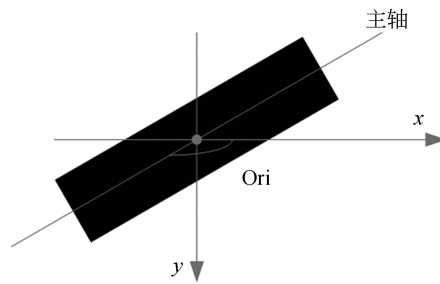


图 7 主轴与坐标系的关系

Fig. 7 Relation of spindle and coordinate

符号 i 右邻域应是其中心距离符号 i 主轴直线距离最短的符号。图 7 描述了矩形块符号的主轴与 x 轴的关系。要求任意符号 j 到符号 i 主轴方向直线的距离,须先求出符号 i 的主轴方程,根据符号 i 的中心点像素坐标 $(A(i,1), A(i,2))$ 和方向 $Orient$,则该直线方程的另一点的坐标 (x_1, y_1) 为:

$$x_1 = A(i,1) + rid * \cos(Orient * pi/180) , \quad (2)$$

$$y_1 = A(i,2) - rid * \sin(Orient * pi/180) , \quad (3)$$

其中: rid 为一常数。即可得到主轴的直线方程为:

$$Ax + By + C = 0 , \quad (4)$$

其中:

$$A = y_1 - A(i,2);$$

$$B = x_1 - A(i,1); \quad (5)$$

$$C = A(i,2) * (x_1 - A(i,1)) * (y_1 - A(i,2))$$

利用公式:

$$d = \frac{|A * x_1 + B * y_1 + C|}{\sqrt{A^2 + B^2}} . \quad (6)$$

即可求出符号 j 到符号 i 主轴方向直线方程的距离。如图 6 所示,在候选项中, j_3 到符号 i 主轴直线的距离最小,所以确定 j_3 为符号 i 的右邻域。由图也可以看出,寻找的结果是正确的。选取阈值 $thresh$ 时(如图 6 蓝色实线圆所示),候选项较少,只有正确的右邻域符号才满足距离主轴直线距离最小,此时直接采用上述方法是可行的。

考虑到一些三维物体表面起伏较大,如图 8 所示,被投射之后,两相邻符号中心的距离也会较大,若阈值 $thresh$ 选择过小,在筛选 i 的候选项时,正确的右邻域符号就可能被剔除掉。例如,图 6 的 j_3 点可能被排除在候选点之外。但若增大阈值(如图 6 蓝色虚线所示)到 $thresh'$,又会出现较大阈值范围内,中心点距离符号 i 主轴直线更近的符号,如图 6 所示,出现符号 k 距离符号 i 主轴直线距离 d_{min2} 小于 j_3 到符号 i 主轴直线的距离 d_{min1} 。所以符号 k 将被认为是符号 i 右邻域的点,类似符号 k 这样的干扰点,将使整个右邻域查找失败。

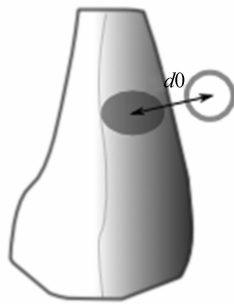


图 8 两符号之间距离

Fig. 8 Distance between two symbols

为了使邻域查找算法适用范围更广,保证算

法对阈值选取不会过于敏感,本文采取以下措施:设置另一个阈值,所有到符号 i 主轴轴线距离小于这个阈值的符号,在图 6 中为 j_3 和 k ,被选为进一步的候选右邻域符号,之后在这个候选右邻域中,与符号 i 最近的 j_3 点被最终确定为符号 i 的右邻域,这样就避免了类似干扰点的影响。

至此,遍历所有符号,当所有符号 i 的右邻域全部找到,则寻找右邻域结束。

图像中符号的下邻域的寻找方法和寻找右邻域类似。但也有区别,寻找下邻域中,求点到直线距离的时候用到的是短轴方向的直线方程。利用短轴和主轴的垂直关系,可以求出短轴方向的直线方程。先求出符号的短轴线上的另一点的坐标 (x_2, y_2) :

$$x_2 = A(i,1) + rid * \sin(Orient * pi/180) , \quad (7)$$

$$y_2 = A(i,2) + rid * \cos(Orient * pi/180) , \quad (8)$$

将式(7)和式(8)代入(4)、(5)即可求出符号到短轴线的距离。图 9 是寻找右邻域和下邻域的流程

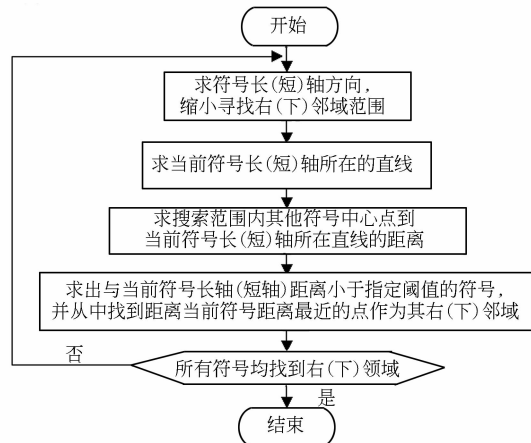
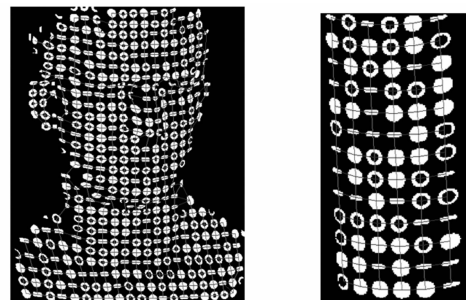


图 9 寻找右邻域和下邻域

Fig. 9 Diagram of finding right neighborhood and nether neighborhood



(a) 雕像

(b) 圆柱

(a) Sculpture

(b) Cylinder

图 10 寻找邻域的结果图

Fig. 10 Obtained neighborhoods

每次寻找到右邻域或下邻域时都用线将寻找结果连接起来,用蓝线连接右邻域,红线连接下邻域,如图 10 所示。该图显示了窗口组建部分结果。

3.4 窗口匹配

三维重构过程中,除要确定每个符号在图像上的二维坐标,还要确定该符号在投射模式中的对应位置,即要对符号进行匹配。通过符号识别和邻域寻找获得一个窗口子阵列,然后利用窗口搜索的方法找出它在投射模式中的位置。当且仅当子阵列中的 9 个数字和投射模式中对应数字完全相同时,两个窗口才算是匹配上。

4 实验

4.1 实验过程

实验使用轮廓复杂的雕像和表面平整的圆柱

为投射对象,利用格雷码和线移码相结合的编码方法进行了结构光系统的标定^[7],使用大小为 M 阵列投射模式投射一次,捕获相关数据。

4.2 实验结果与分析

选取雕塑额头和鼻子为代表来分析,由图 11(a)可知,阈值 $thresh$ 较小时,雕塑额头部位右邻域与下邻域都被正确找出;而鼻子部位,由于表面深度变化较大,如图 11(a)(II)所示,鼻子根部符号无法查找到其右邻域的符号,造成查找中断;在 11(b)中,增大阈值,扩大邻域查找的范围,再次查找,如 11(b)(II)所示,根部符号都顺利找到其右邻域符号。对于雕塑额头来说,额头相对比较平整,前后两次阈值下,都能够准确找到邻域如图 11(a)和 11(b)中(I)所示。事实上,在实验中,多次调整阈值之后,额头每次都能正确查找邻域,这是由算法的稳定性决定的。实验的另一对象是圆柱,由于圆柱比雕塑额头还要平整,所以圆柱基本不受阈值变化的影响,每次都能查找正确,查找的结果如图 10(b)所示。

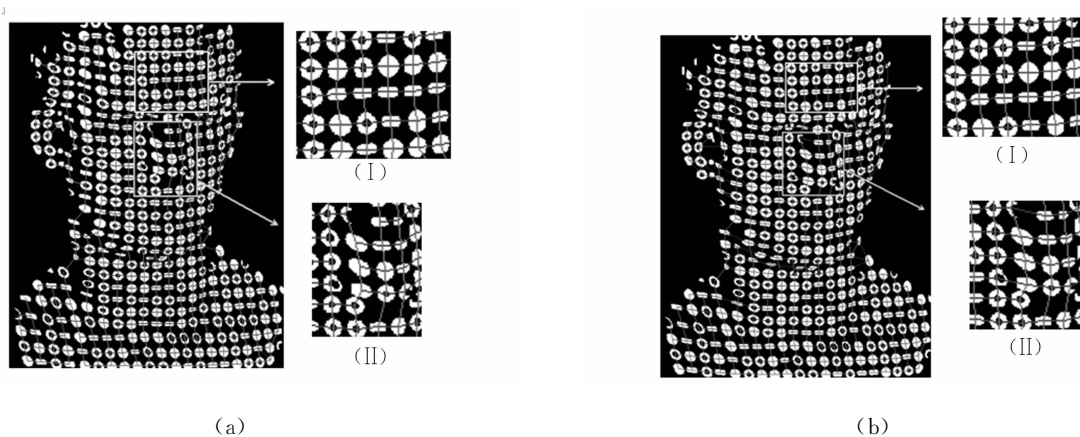


图 11 不同阈值下的邻域查找

Fig. 11 Neighborhood searching under different thresholds

在正确识别符号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符号,对匹配的符号依据三角原理,重构出各

个对应点的深度信息。从而得到物体表面的三维轮廓。三维点云图如图 12 所示,三维表面图如图 13 所示,重构效果图如图 14 所示。

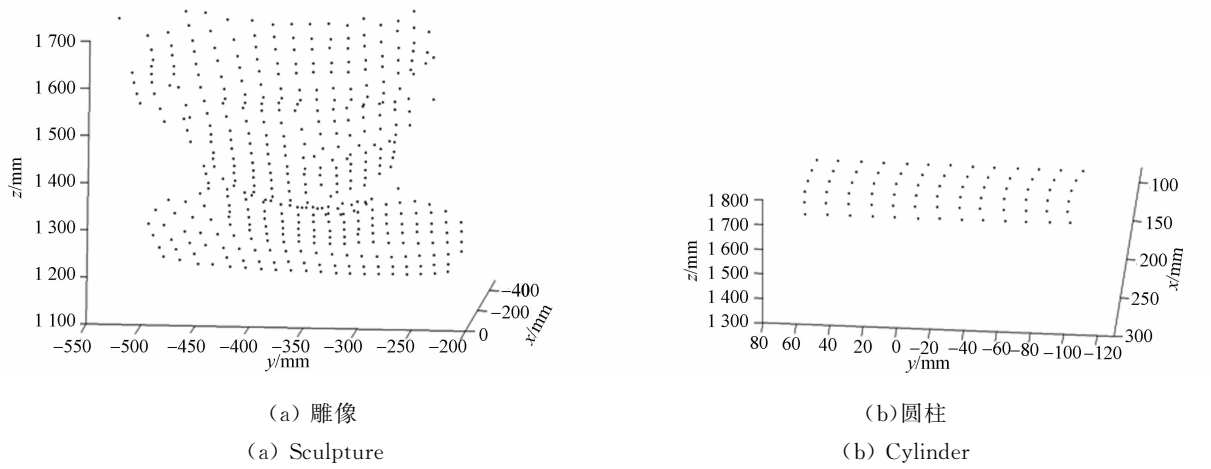


图 12 三维点云图
Fig. 12 3-D point clouds

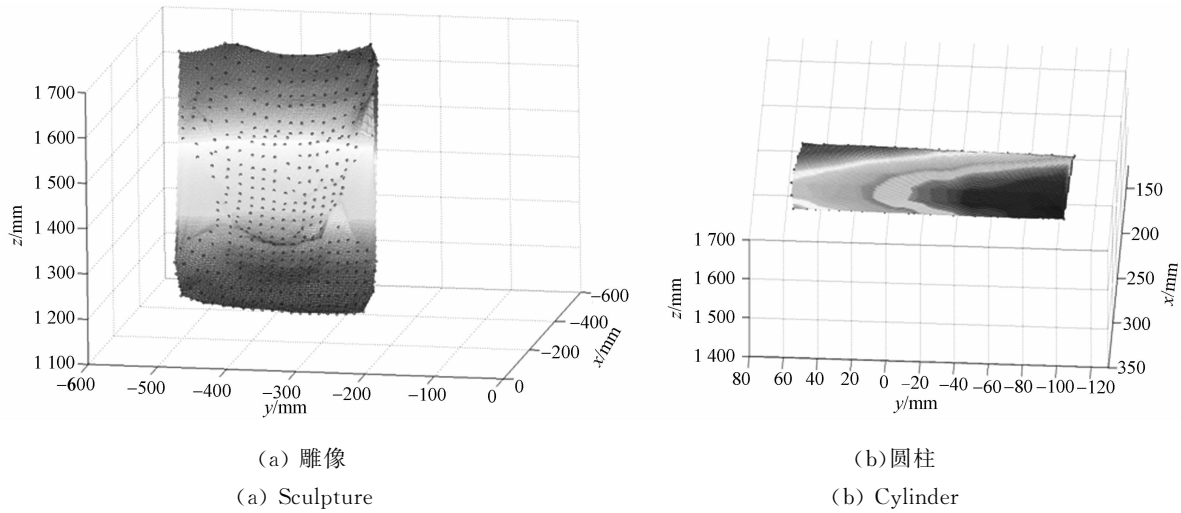


图 13 三维面图
Fig. 13 3-D surface graphs

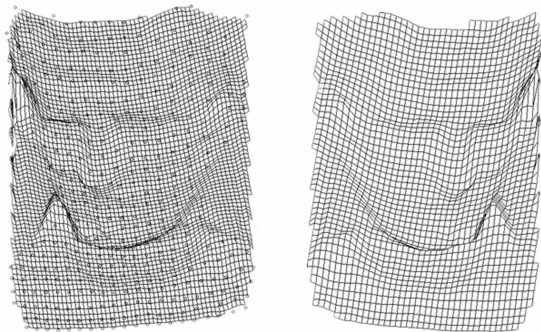


图 14 重构效果图
Fig. 14 Reconstruction of 3D surface

4.3 算法复杂度分析

设需要处理的符号个数为 n , 符号识别时, 只

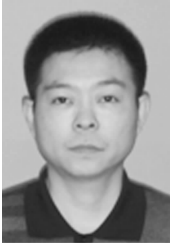
需遍历符号一遍, 即可将 3 类符号识别出来, 算法时间复杂度为 $O(n)$ 。邻域寻找时, 以右邻域的查找为例, 若当前符号为矩形块, 计算其长轴方向, 并与长轴上另一点求出长轴方程。若不是矩形块, 则需要查找距离其最近的矩形块, 进而确定右邻域的方向。由于候选右邻域点只在以当前点为圆心, 一定阈值为半径的圆形区域内, 而不需要在全部区域进行查找, 其中计算量大的点到直线距离的计算次数大大减少, 所以算法的效率较高。

4.4 误差分析

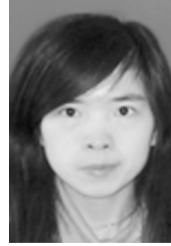
为评估解码的准确度, 文中对圆柱测量结果进行了定量分析, 如图 15 所示, 使用圆拟合重构后的同一平面上的点, 共拟合出 12 组圆, 然后测其直径, 求出平均值。由测量直径与实际直径就

- KONG L X, CHENG Y M, WANG Y X. *Depth Image Analysis*[M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry,1996. (in Chinese)
- [3] OISEN O V, PAULSEN R R. Motion tracking for medical imaging: a novel structured light tracking approach [J]. *IEEE Transactions on Medical Imaging*, 2012,31:79-87.
- [4] ALBITAR I C, GRAEBLING P, DOIGNON C. Robust Structured light coding for 3D reconstruction [J]. *Computer Vision*, 2007,11:1-6.
- [5] 张海花,李勇,卢世江,等.时空二值编码结构光三维成像中的亚像素匹配方法[J].*中国激光*,2011,38(10):1-6.
- ZHANG H H, LI Y, LU S J, *et al.*. Subpixel Matching of Three-Dimensional Imaging System Using Binary Spatiotemporal Encoded Illumination [J]. *Chinese Journal of Lasers*,2011,38(10):1-6. (in Chinese)
- [6] THOMAS P. Real-time range acquisition by adaptive structured light[J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2006, 28(3):432-444.
- [7] LI ZH, BRIAN C, STEVEN M. Rapid shape acquisition using color structured light and multi-pass dynamic programming [C]. // *Proceedings of the 1st International Symposium on 3D Data Processing, Visualization and Transmission, Padova, Italy*,2002:24-36.
- [8] JESSIE F, NEIL J A. Pseudo-random sequences and arrays[J]. *IEEE*, 1976,64(12):1715-1727.
- [9] HIROSHI H, KOICHI Y, SENYA K, *et al.*. Measurement of 3-D shape of specular polyhedrons using an M-array coded light source [J]. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 1995, 44(3):775-778.
- [10] HIROYOSHI M, KAZUYASU Y, SHOJIRO S. Reconstruction of surfaces of 3-D objects by M-array pattern projection method [C]. // *Second International Conference on Computer Vision*, New York, 1988:468-473.
- [11] 朱殿尧,卞红雨.矩形和(椭)圆区域目标的分类识别[J].*激光与红外*,2009,39(11):1228-1232.
- ZHU D Y, BIAN H Y. Classification between rectangular and ellipsoid/circular areas [J]. *Laser And Infrared*,2009,39(11):1228-1232. (in Chinese)
- [12] Inf. Technol. Dept, Dharmasinh Desai Univ., Nadiad, India. Analytical Study of Parallel and Distributed Image Processing [J]. *Image Information Processing*, 2011,11:1-6.
- [13] LI L, XIAO Y Y, HUANG J. An efficient image processing method based on web services for mobile devices [J]. *Image and Signal Processing*, 2009,10:1-5.
- [14] 谭志飞,毛美娇,龚娟.改进滤波算法在机器人视觉目标图像处理中的应用研究[J].*机械科学与技术*,2011,30(5):823-832.
- TAN Z F, MAO M J, GONG J. Application of an improved filtering algorithm to robot vision target image processing [J]. *Mechanical Science and Technology for Aerospace Engineering*, 2011,30(5):823-832. (in Chinese)
- [15] HIROSHI K, RYO F, RYUSUKE S, *et al.*. Dynamic scene shape reconstruction using a single structured light pattern [C]. *Computer Vision and Pattern Recognition*,2008:1-8.
- [16] 陆军,黄春明.符号M阵列结构光的编码研究[J].*光电工程*,2012,39:1-5.
- LU J, HUANG C M. Coded research of structured light based on symbol M-array[J]. *Opto-Electronic Engineering*,2012,39:1-5. (in Chinese)
- [17] 陆军,宋成业.基于格雷码和线移编码的机构光系统标定[J].*光电子·激光*,2012, 23:1-5.
- LU J, SONG C Y. Structured light system calibration based on Gray code combined with line-shift [J]. *Journal of Optoelectronics · Laser*, 2012, 23:1-5. (in Chinese)

作者简介:



陆 军(1969—),男,黑龙江哈尔滨人,教授,1991 年于哈尔滨船舶工程学院获得学士学位,1994 年于哈尔滨工程大学获得硕士学位,2001 年于哈尔滨工程大学获得博士学位,主要从事自动控制、机器人、机器视觉的研究。E-mail: lujun0260@sina.com



黄春明(1986—),女,福建泉州人,硕士研究生,2009 年于哈尔滨工程大学获得学士学位,2012 年于哈尔滨工程大学获得硕士学位,主要从事自动控制、机器人、机器视觉的研究。E-mail: spring8252@126.com



李积江(1986—),男,河南信阳人,硕士研究生,2010 年于河南科技大学获得学士学位,主要从事自动控制、机器人、机器视觉的研究。E-mail: v2012@163.com

(版权所有 未经许可 不得转载)