

基于双目结构光的螺纹参数测量方法研究

王永强¹ 王书海¹ 宿景芳¹

WANG Yongqiang WANG Shuhai SU Jingfang

摘要

在工业生产中, 螺纹作为一种重要的传动部件, 在许多自动化设备中得到了广泛的应用。针对以往人工测量螺纹效率低、测量精度不高的问题, 提出了一种基于双目结构光三维点云数据测量螺纹参数的方法。将编码后的光栅条纹图案投射到螺纹物体表面进行调制, 同时相机同步采集螺纹表面产生形变的光栅图像, 并通过解码计算三维面形数据。传统的格雷码编码方法和六步相移编码方法都有一定的不足之处, 因此为实现对螺纹的高精度三维点云数据的获取, 采用互补格雷码结合六步相移的快速相位展开方法, 对螺纹进行三维重建, 得到有效的点云数据。与传统的格雷码结合六步相移法相比, 所提出的方法能有效消除相位展开误差, 提高了螺纹测量精度。

关键词

结构光; 六步相移; 互补格雷码; 三维重建

doi: 10.3969/j.issn.1672-9528.2024.05.007

0 引言

螺纹连接技术被广泛应用于机械工业的多个领域。螺纹轮廓的质量直接影响螺纹件的承载能力, 随着现代工业生产对螺纹质量要求的不断提高, 螺纹表面质量已成为判断其质量的重要指标^[1]。螺纹具有轮廓复杂、参数繁多(例如螺距、直径等)的特点。标准的螺纹质量验证技术是基于使用螺纹量规和专门的测量技术, 如“三丝法”。对此, 专家学者们已经在英国国家物理实验室和欧洲国家计量研究所协会的文件中以更广泛的方式进行了讨论^[2]。然而, 已知这种方法具有局限性。仪表很容易磨损, 需要定期检查和更换有缺陷的部件, 这就增加了检查成本。用标准视觉方法评估螺纹参数, 在某种程度上也取决于进行检查的操作人员的能力。另一种检测方法是基于使用三坐标测量机。Kosarevsky 等人^[3]使用霍夫变换开发的算法去评估单个螺纹轮廓的参数, 即螺纹节距和侧面角。这种类型的测量需要适当的实验室设施和经验丰富的操作人员, 并且不能在生产线上进行。

近年来, 光学测量方法越来越受欢迎, 越来越多的检测任务使用机器视觉系统来执行, 例如检查齿轮生产或吊装绳索的状况, MutambiJ 等人^[4]提出了一种基于 CCD 相机和工具制造商显微镜获得的图像来确定基本螺纹参数的方法, 采用统计分析方法确定参数: 螺距、螺纹直径; Tong 等人^[5]开发了一种高速、自动化的内部螺纹参数测量系统; Min J 等人^[6]提出了一种基于光学放大的测量螺纹高

精度几何误差的方法^[5]。这些主流的螺纹测量仪器只能获得一维(1D)或二维(2D)的结果, 这些结果不能反映螺纹的真实三维(3D)特性。因此, 本文搭建一种基于双目结构光的三维重建系统, 对螺纹进行三维测量。

在三维重建过程中, 两种主要的相位获取方法是傅里叶变换轮廓术(FTP)法和相移法。一般来说, 傅里叶变换只需要一个条纹图, 而相移需要多个条纹图来提取被测物体的相位图。然而, 与傅里叶变换相比, 如果测量形状或不连续表面的突然变化, 相移法效果更好。这两种算法都涉及反正切函数: 提取的相位图被包裹在具有 2 个相位跳变的 $[0, 2\pi]$ 范围内。因此, 需要进行相位解包裹过程来恢复绝对相位图。相位展开的方法很多, 可分为两大类: 空间相位展开方法^[7-8]和时间相位展开方法^[9-10]。然而, 空间相位展开方法假定了相位连续性, 因此无法处理孤立的物体或突然的形状转变。时间相位展开方法可以通过使用几种编码模式来提供有关条纹顺序的附加信息, 从而克服这一限制。

目前, 格雷码法和相移法是广泛应用于三维重建的编码方法, 格雷码法是一种时间编码方法, 具有高空间分辨率、精度高和易于实现等特点, 但需投影大量格雷码图案, 整个重建过程会受到图像采集和解码所需的时间影响, 并且格雷码无法编码到单个像素。在相位展开过程中, 受到格雷码二值化以及无关背景像素点等因素的影响, 会导致包裹相位和格雷码条纹阶次出现错位现象, 导致解码发生错误, 进而影响重建的速度和精度。相移法同样也是时间编码方法, 具有周期性, 重建的空间精度较高^[11], 但相移法解码时对像素值的取值范围有限, 导致无法完全编码空间中的某些点, 并且在选择相位步数时, 步数越多, 越能减少相位偏差, 提高测

1. 河北科技大学信息科学与工程学院 河北石家庄 050018

[基金项目] 河北省高等学校科学技术重点研究项目(ZD2020318); 河北省教育厅青年基金(QN2023185)

量精度,但是步数越多,也越会影响重建的速度^[12]。因此,有学者提出了相移码结合格雷码的方法,其具有很好的鲁棒性和抗噪性,能对表面复杂的物体进行较好的重建。

Wu 等人^[13]提出了一种传统的空间相位解包法和格雷码法相结合的方法来处理相位展开误差,但速度相对很慢;王中兴提出了一种基于十六步相移法的三维重建系统^[14],能够较好地对待测物的重建,但投影图片数量相对较多;Chen 等人^[15]提出了一种额外投影一黑一白的图案,来对格雷码二值化进行处理;孙学真等人^[16-17]提出了互补格雷码编码方法,该方法能够对误码位置进行修正,但仍可能存在一些相邻错位点。

本文采用互补格雷码结合六步相移的快速相位展开方法对被测螺纹进行三维重建。首先使用格雷码对光源进行编码,在光源编码完成后,使用相移法对结构光图案进行编码;然后通过使用光栅投影仪,将提前设计好的结构光编码图案投射到被测螺纹上。两台相机同时采集被测螺纹表面高度调制后的结构光图案,并提取获取的相位信息。通过对相位进行展开,进行立体匹配,并结合三角法测量原理,实现对物体的三维测量。最终,可完成对物体的三维重建。

1 格雷码编解码原理

1.1 格雷码编码设计

本部分采用递归来生成格雷码编码,经过观察发现 n 位格雷码可以由 $(n-1)$ 位格雷码得到,具体方式为:首先列出 $n-1$ 位格雷码的 2^{n-1} 个编码序列;然后将该序列进行逆序排列,即得到其逆序列,写在前一个编码序列的后面,这将得到一个 2^n 个码值序列;最后在正序列码值的左侧添加数字 0,在逆序列码值的左侧添加 1,即可获得 n 位格雷码的编码序列。本文采用 4 位格雷码,格雷码图案如图 1 所示,其中前 4 张图片为 4 位格雷码图案,能够将图像划分为 16 个区间,每 64 个像素具有相同的格雷码值。为消除解包裹相位时的周期错位问题,采用互补格雷码的方法,还需 5 位格雷码的第 5 级格雷码图案,如图 1 中第 5 幅图片。



图 1 格雷码编码图案

1.2 格雷码解码

根据二进制码与格雷码之间的转化原理,可对格雷码进行解码。格雷码因其相邻数字的编码只有一位不同,可以减少解码的错误率,格雷码求解的步骤是先将格雷码转换成二进制码,再将二进制码进一步转换成十进制数值,即十进制的条纹周期级次 k ,从而对包裹相位进行展开。要想得到较

好的三维重建结果,需要预先消除图像无关背景区域像素点,避免其影响解码的精度,同时有利于提高相位展开的速度,并且要对采集的格雷码图进行二值化处理。

Daniel Scharsterin 在研究高精度视差图求解方法时,提出了一种解码方法,在投射格雷码条纹图案基础上,再投射一组格雷码反码条纹图案,分别投射到被测物体上,然后使用相应的两组图像进行解码。然而,这种方法要求投影的图片数量是格雷码编码图案数量的两倍,这使得操作较为繁琐。因此,本研究采用了以下策略:在完成格雷码图案的投影后,再次进行两张图像的投影,其中一张为全黑,另一张为全白。接下来,计算相同位置的像素在两种情况下的平均灰度值,并将其用于执行图像二值分割的阈值。考虑到在某些特定区域投射暗条纹和亮条纹时图像的灰度存在差异,因此可以采用上述方法进行二值分割。此方法与投影正反格雷码的方法相似,均基于二值化原则:对于同一位置,其被亮条纹照射到的亮度总是高于其被暗条纹照射的亮度。然而,本文所使用的方法在投影格雷码图案时将数据量减半,从而有效地降低了计算和投影所需的时间。



图 2 黑白图案

假设图像上任意一点 (x, y) 在投影全白图案和全黑图案时的像素灰度值分别为 p_w 和 p_b ,当执行二值分割时,阈值表达式为:

$$t = \frac{p_b + p_w}{2} \quad (1)$$

对于格雷码编码的灰度图像,设定图像中的任意像素位置 (x, y) 的灰度值为 p 。如果 p 小于设定的阈值 t ,则对应的二值像素为 0;反之,如果 p 大于设定的阈值 t ,则对应的二值像素为 1。经过上述处理,对多幅图像进行相同的操作,实现每个像素点在不同图像中的二值化。得到每个像素点在不同图像中的二值化结果后,将它们组合成格雷码码字。根据格雷码编码规则,将每个像素点的格雷码码字转换为相应的十进制格雷码值。

2 格雷码结合相移法的相位展开

格雷码结合相移法技术是一种用于结构光三维重建和深度感知的高效方法。它通过结合格雷码和相移编码的原理,实现快速、准确的深度测量和三维重建。首先使用格雷码对光源进行编码,在光源编码完成后,使用相移法对结构光图案进行编码;然后使用相机对目标场景进行图像采集;接下来,通过解码相位差,可以计算出每个像素点的深度或距离值,通过解码得到的深度信息,可以进行三维重建。通过配

准和融合不同相机视角下的深度图像，可以生成完整的三维模型或点云，表示目标场景的几何形状。

2.1 传统格雷码结合六步相移相位展开

本文所采用的六步相移结构光技术是基于相位法的三维形状测量技术。相位具有连续性的特点，因此在同一周期内，每个空间点的相位值具有唯一性。对比传统的三步和四步相移解码，本文方法具有更高的测量精度。相移编码可以通过不同相位的余弦函数来设计产生不同相位的编码图。条纹图像可以用数学形式描述为：

$$I(x, y) = k \{ A(x, y) + B(x, y) \cos[\varphi(x, y) + \theta] \} \quad (2)$$

式中： $I(x, y)$ 为相机采集到的物体表面上的灰度值， $A(x, y)$ 和 $B(x, y)$ 为条纹光强的背景值， k 为波系数， $\varphi(x, y)$ 为 (x, y) 点的相位，表示包裹相位， θ 表示平移相位。本文采用的平移相位 $\theta = \pi/3$ ，因此六步相移图像的推导公式为：

$$I_0(x, y) = k [A(x, y) + B(x, y) \cos \varphi(x, y)] \quad (3)$$

$$I_1(x, y) = k \{ A(x, y) + B(x, y) \cos[\varphi(x, y) + \pi/3] \} = k \left\{ A(x, y) + B(x, y) \left[\frac{1}{2} \cos \varphi(x, y) - \frac{\sqrt{3}}{2} \sin \varphi(x, y) \right] \right\} \quad (4)$$

$$I_2(x, y) = k \{ A(x, y) + B(x, y) \cos[\varphi(x, y) + 2\pi/3] \} = k \left\{ A(x, y) + B(x, y) \left[-\frac{1}{2} \cos \varphi(x, y) - \frac{\sqrt{3}}{2} \sin \varphi(x, y) \right] \right\} \quad (5)$$

$$I_3(x, y) = k \{ A(x, y) + B(x, y) \cos[\varphi(x, y) + \pi] \} \quad (6)$$

$$I_4(x, y) = k \{ A(x, y) + B(x, y) \cos[\varphi(x, y) + 4\pi/3] \} = k \left\{ A(x, y) + B(x, y) \left[-\frac{1}{2} \cos \varphi(x, y) + \frac{\sqrt{3}}{2} \sin \varphi(x, y) \right] \right\} \quad (7)$$

$$I_5(x, y) = k \{ A(x, y) + B(x, y) \cos[\varphi(x, y) + 5\pi/3] \} = k \left\{ A(x, y) + B(x, y) \left[\frac{1}{2} \cos \varphi(x, y) + \frac{\sqrt{3}}{2} \sin \varphi(x, y) \right] \right\} \quad (8)$$

根据上述公式可推导出：

$$I_5 - I_1 = I_4 - I_2 = kB(x, y) \sin \varphi(x, y) \quad (9)$$

$$I_0 - I_3 = 2kB(x, y) \cos \varphi(x, y) \quad (10)$$

因此得出目标图像的包裹相位公式为：

$$\varphi(x, y) = \frac{1}{\sqrt{3}} \arctan \frac{I_5 - I_1 + I_4 - I_2}{I_0 - I_3} \quad (11)$$

包裹相位是通过反正切函数求得，因此求得的值被截断在 $[0, 2\pi]$ 中，不是连续的相位，需要进行相位展开。对于传统格雷码的方法，首先对投影仪的格雷码图进行解码，得到条纹阶次，将二值化后的格雷码条纹 $GC_i(x, y)$ 由高位到低位按位异或得到二进制序列 $B_i(x, y)$ ：

$$B_i(x, y) = G_{i+1}(x, y) \oplus G_i(x, y), i = 0, 1, \dots, n-2 \quad (12)$$

然后将其通过计算转化为十进制条纹阶次：

$$k(x, y) = \sum_{i=1}^N B_i(x, y) \cdot 2^{(N-i)} \quad (13)$$

最后利用公式 (14) 完成对包裹相位的展开，绝对相位 $\phi(x, y)$ 表示为：

$$\phi(x, y) = \varphi(x, y) + 2\pi k(x, y) \quad (14)$$

2.2 互补格雷码结合六步相移相位展开

在实际测量过程中，由于受到环境噪声等因素的干扰，格雷码条纹的阶次与包裹相位之间容易发生错位，导致展开相位出现错误。对此，设计了一种互补格雷码的方法，本文选用了 4 幅传统格雷码，并在 4 位传统格雷码的基础上额外投射了包含 5 位格雷码的最后一幅图，作为互补格雷码。前 4 张格雷码的条纹阶次表示为 k_1 ，而第 5 张互补格雷码的条纹阶次表示为 k_2 。这两个条纹阶次之间相互错开了半个周期，并且通过结合高斯滤波，成功地消除了高斯噪声，从而有效预防了在解码边界时可能出现的错误。利用公式 (15) 进行相位展开，如下所示：

$$\varphi(x, y) = \begin{cases} \varphi(x, y) + 2\pi k_2, & \varphi(x, y) \leq -\frac{\pi}{2} \\ \varphi(x, y) + 2\pi k_1, & -\frac{\pi}{2} \leq \varphi(x, y) < \frac{\pi}{2} \\ \varphi(x, y) + 2\pi k_2 - 2\pi, & \varphi(x, y) \geq \frac{\pi}{2} \end{cases} \quad (15)$$

3 仿真实验与结果分析

本实验搭建的基于双目结构光的三维重建系统是由计算机、DLP 投影仪 (Light Crafter 4500)、2 台分辨率为 400 万像素相机以及标定板组成，投影仪分辨率为 1140×912 。首先，利用棋盘格标定板标定双目相机的内外部参数和畸变参数，标定过程是调用 OpenCV 开源算法库中的张定友标定法来计算左右相机内外参数及相对位置关系，获取互补格雷码加六步相移图像，通过投影仪设备将一系列的编码图像投影到被测的螺纹模型上；然后，使用双目相机进行图像采集，对拍摄到的图像进行畸变校正，并求解出绝对相位信息，根据解码值进行立体匹配，根据相机内部、外部参数求解出相应点的坐标，得到相对应的点云数据。

传统格雷码相移点云结果图如图 9 所示，互补格雷码相移点云结果图如图 10 所示。

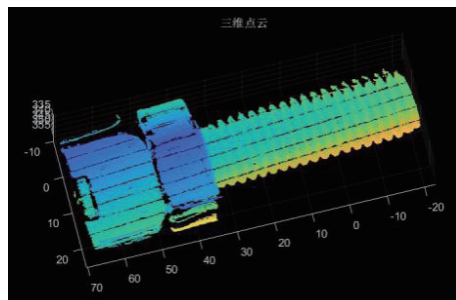


图 9 传统格雷码相移点云结果图

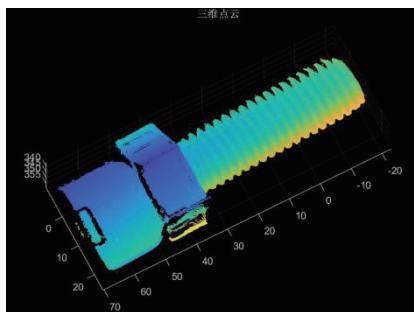


图 10 互补格雷码相移点云结果图

螺纹测量结果如表 1 所示。

表 1 螺纹三维测量结果比较

参数	理论值 /mm	传统方法 /mm	改进方法 /mm	传统方法 误差率 /%	改进方法 误差率 /%
大径	20.0	19.86	19.92	0.70	0.40
小径	17.29	16.95	17.11	1.96	1.04
长度	50.0	50.22	50.13	0.44	0.26
螺距	2.5	2.42	2.46	3.20	1.60

通过实验进行运行及测试后，本系统重建的实验结果如表 1 所示。表 1 所示的两种方法测量结果表明，本文所采用的互补格雷码结合六步相移法的对螺纹的大径、小径、长度和螺距的误差率分别为 0.075%、1.04%、0.26% 和 1.60%。与传统格雷码结合六步相移法对应的 1.40%、1.96%、0.44% 和 3.20% 的测量率相比，各参数的测量精度分别提高了 0.30%、0.92%、0.18% 和 1.60%。通过三维点云图也可以看出，互补格雷码结合六步相移法比传统格雷码结合六步相移法的点云数据更光滑，丢失数据更少。可见，本文所采用的基于互补格雷码结合六步相移的结构光方法，较好地克服了传统格雷码和传统相移法存在的问题，从而实现了物体高精度三维结构的重建。

4 结论

针对以往人工测量螺纹效率低、测量精度不高的问题，提出了一种基于双目结构光三维点云数据测量螺纹参数的方式，用于测量螺纹的大径、中径、长度和螺距。通过采用的基于互补格雷码结合六步相移的结构光方法对螺纹进行三维重建，得到有效的点云数据，使其更准确地获得螺纹的结果。测量结果表明，该方法在螺纹大径、中径、长度和螺距的测量误差率方面比传统方法分别提高了 0.30%、0.92%、0.18% 和 1.60%。目前，该测量结果并非自动测量，在后期工作中，会开发相应的系统，自动对螺纹的各个参数进行测量并保存结果，同时对点云数据进行拼接，得到完整的螺纹点云数据。

参考文献：

- [1] 张堃, 李子杰, 瞿宏俊, 等. 基于注意力机制和隐马尔科夫的高精密螺纹全自动精确测量[J]. 南通大学学报(自然科学版), 2021, 20(3): 57-66.
- [2] 张爱云, 王吉华, 高巍. 基于点激光和视觉引导的瓶口螺纹测量系统[J]. 传感技术学报, 2021, 34(12): 1697-1704.
- [3] CARMIGNATO S, CHIFFRE D L. A new method for thread

- calibration on coordinate measuring machines[J]. CIRP annals-manufacturing technology, 2003, 52(1): 447-450.
- [4] MUTAMBI J, YU L. Application of digital image analysis method in metric screw thread metrology[J]. Journal of shanghai university (english edition), 2004, 8(2): 208-212.
- [5] TONG Q, HAN B, WANG D, et al. A novel laser-based system for measuring internal thread parameters[J]. Journal of russian laser research, 2014, 35: 307-316.
- [6] MIN J. Measurement method of screw thread geometric error based on machine vision[J]. Measurement and control, 2018, 51(7-8): 304-310.
- [7] 张宗华, 于瑾, 高楠, 等. 高反光表面三维形貌测量技术[J]. 红外与激光工程, 2020, 49(3): 104-116.
- [8] WAN Y, CAO Y, KOFMAN J. High-accuracy 3D surface measurement using hybrid multi-frequency composite-pattern temporal phase unwrapping[J]. Optics express, 2020, 28(26): 39165-39180.
- [9] ZHANG C, ZHAO H, GAO X, et al. Phase unwrapping error correction based on phase edge detection and classification[J]. Optics and lasers in engineering, 2021, 137(2): 106389.
- [10] 魏鹏轩, 黄智, 郑晓, 等. 多鸟巢自适应排序的快速相位展开方法[J]. 红外与激光工程, 2020, 49(8): 177-183.
- [11] 李洋, 李岩, 赵爱国, 等. 四步相移结合互补格雷码的快速相位展开[J]. 激光杂志, 2022, 43(2): 36-41.
- [12] ZHANG Q, SU X, XIANG L, et al. 3D shape measurement based on complementary Gray-code light[J]. Optics and lasers in engineering, 2012, 50(4): 574-579.
- [13] WU Z, GUO W, LI Y, et al. High-speed and high-efficiency three-dimensional shape measurement based on Gray-coded light[J]. Photonics research, 2020, 8(6): 819-829.
- [14] 王中兴. 基于十六步相移技术的高精度三维重建系统[J]. 软件导刊, 2021, 20(5): 108-113.
- [15] CHEN J, WAN Z, ZHANG J, et al. Medical image segmentation and reconstruction of prostate tumor based on 3D AlexNet[J]. Computer methods and programs in biomedicine, 2021, 200: 105878-105886.
- [16] 孙学真, 苏显渝, 邹小平. 基于互补型光栅编码的相位展开[J]. 光学学报, 2008(10): 1947-1951.
- [17] 邓吉, 李健, 封皓, 等. 编码条纹投影技术的阶次校正算法[J]. 仪器仪表学报, 2018, 39(8): 250-258.

【作者简介】

王永强 (1998—), 男, 河北张家口人, 硕士, 研究方向: 机器视觉。

王书海 (1968—), 男, 河北石家庄人, 硕士, 副教授, 研究方向: 计算机自动控制及检测。

宿景芳 (1980—), 女, 河北石家庄人, 博士, 讲师, 研究方向: 机器视觉、人工智能。

(收稿日期: 2024-03-08)