

北京交通大学

硕士学位论文

基于空间编码结构光的高精度三维重构关键技术研究

Research on Key Technology of High Precision 3D Reconstruction
Based on Spatial Coded Structured Light

作者：白宏运

导师：许宏丽

北京交通大学

2018 年 3 月

学位论文版权使用授权书

本学位论文作者完全了解北京交通大学有关保留、使用学位论文的规定。特授权北京交通大学可以将学位论文的全部或部分内容编入有关数据库进行检索，提供阅览服务，并采用影印、缩印或扫描等复制手段保存、汇编以供查阅和借阅。同意学校向国家有关部门或机构送交论文的复印件和磁盘。学校可以为存在馆际合作关系的兄弟高校用户提供文献传递服务和交换服务。

（保密的学位论文在解密后适用本授权说明）

学位论文作者签名： 邵磊运

签字日期：2018年3月8日

导师签名： 许宏丽

签字日期：2018年3月8日

学校代码：10004

密级：公开

北京交通大学

硕士学位论文

基于空间编码结构光的高精度三维重构关键技术研究

Research on Key Technology of High Precision 3D Reconstruction
Based on Spatial Coded Structured Light

作者姓名：白宏运

学 号：15120482

导师姓名：许宏丽

职 称：教授

学位类别：工学

学位级别：硕士

学科专业：软件工程

研究方向：计算机视觉

北京交通大学

2018 年 3 月

致谢

两年多的研究生生活眼看就要结束了，心里突然有一种激动和憧憬的心情。在毕业之际，对于校园的生活和社会的实践，我有渴望、有追求、有成功也有失败，但我始终孜孜不倦，不断地挑战自己，充实自己，为今后实现自己的人生价值打下坚定的基础。非常幸运自己能在北京交通大学度过两年多充实而有意义的研究生生活，感谢交大两年多的培养，交大塑造了我独立的人格，让我在踏入社会的同时多了一份自信，也多了一份豪情和壮志。至此毕业论文完成之际，我谨向母校，向所有关心、帮助和支持我的人们表示最诚挚的感谢与最美好的祝愿。

本论文是在我的导师许宏丽老师的亲切关怀和悉心指导下完成的。许老师严谨细心的治学精神，精益求精的工作作风，深深的影响和激励着我。在平时的学习和工作中，许老师总是能像知心的朋友一样鼓励着我，从论文的选题、开题，一直到论文最后的撰写、润色和反复修改，许老师始终能认真负责地给予我细致而深刻的指导。正是许老师的无私帮助与热忱的鼓励，我的毕业论文才能得以顺利完成，在此谨向许老师致以衷心的感谢和崇高的敬意。

此外，我还要感谢实验室的另外两位老师，分别是尹辉老师和黄华老师。两位老师在平时的学习中也给予了我很多帮助，他们不仅使我在学习上收获颇丰，还在生活、工作以及待人处事方面给予了我很大的帮助和启发，这些都是我今后人生之路上的宝贵财富，在此谨向两位老师表示衷心的感谢。

在撰写论文的过程中，实验室的小伙伴们也给了我很多无私的帮助，在此感谢杨城笃师兄，李龙师兄，刘文才师兄、吴军旗师兄、于海跃师姐、胡仁东、欧伟奇、田贺英、张哲、刘志浩、王毅恒、杨林、侯琳琳、刘静静、陈荣、刘磊、高佳月、万金、崇爱新、张世杰、常恰时、赵洋、梁琮、梁望、薛佳、Roger、Tigistu 等同学对我论文的校正工作给予了很大的帮助，在此向他们表达我的感激之情，愿友谊长存！

另外也感谢我挚爱的家人，家人是我坚强的后盾，一直都是鼓励和理解我，正是他们的支持和理解，我才能在学校专心完成学业。

最后，再次感谢我的导师许宏丽教授，感谢每一个爱我和我爱的人，感谢我的家人，感谢每一位帮助过我的人。

本文在国家自然科学基金(No.61472029,61473031)、科技部国家重点研发计划(No.2016YFB1200100)、北京市自然科学基金(No.4152042)和中央高校基本科研业务费专项资金(No.2016JBZ005,2016JBM019, 2016JBM016)的资助下完成。

摘要

编码结构光三维重构技术是一种主动式重构技术，与被动式三维重构技术相比，该技术具有匹配精度高、测量速度快和鲁棒性好的优点，在工业形貌测量、医学工程和文物修复等领域已经得到广泛应用。目前，编码结构光三维重构技术的研究热点主要集中在两个方面：(1)提高三维重构的精度与速度，(2)实现运动物体全表面立体重构。

本文以提高空间编码结构光三维重构的精度为目标，主要研究了结构光空间编码算法、结构光解码算法和系统参数标定算法。本文的主要工作如下：

(1) 研究了结构光编码技术。针对空间编码的空间分辨率较低的问题，提出一种基于被测物体表面几何特征的自适应结构光空间编码算法。首先，基于本文提出的条纹密集度特征，确定结构光图像上条纹稀疏和密集的区域，再基于目标表面几何特征投影模型的反馈调节信息，完成结构光编码图案条纹间距的自适应调节，从而获得空间分辨率较高的自适应结构光空间编码图案，实现特定物体高精度三维重构。通过实验对比分析验证了本文提出方法的有效性。

(2) 研究了结构光解码技术。针对物体表面纹理和光照对结构光图像的影响导致解码精度不高的问题，提出一种基于色彩迁移技术的彩色结构光解码算法。首先，以结构光编码图案的颜色分布为先验知识，利用色彩迁移的方式对相机捕获的结构光图像进行增强和去光照处理，还原结构光图像条纹的颜色信息；其次，提出了两步精确定位的彩色结构光图像条纹中心点亚像素提取算法，从而可以准确提取出条纹的中心坐标，实现高精度解码。通过结构光图像增强处理实验对比，本文提出的算法比 Retinex 算法匹配精度平均提高了 5% 左右；通过特征点检测实验对比，本文算法比 Rongqiang Yang 算法提取错误率平均降低了 4% 左右，验证了本文提出算法的有效性。

(3) 研究了结构光系统标定和结构光三维重构技术。针对系统参数标定不精确导致三维重构精度不高的问题，提出了基于局部单应性矩阵的系统标定算法，且设计并实现了基于空间编码结构光的三维重构系统和标定系统。首先，将结构光编码图案投影到标定板上，通过解码得到投影图案平面和相机成像平面之间的全局单应性矩阵，然后，计算标定板上每个特征角点的局部单应性矩阵，采用局部单应性矩阵求解出特征角点在投影平面上精确的像素坐标，最终实现了高精度的结构光系统标定和结构光三维重构。

关键词：空间编码结构光；自适应；DeBruijn；色彩迁移；高精度；三维重构

ABSTRACT

Coded structured light 3D reconstruction technology is a kind of active 3D reconstruction technology. Compared with the passive 3D reconstruction technology, this technique has the advantages of high matching precision, fast measurement speed and good robustness, which has been widely used in the field of industrial measurement, medical engineering and cultural relic repair. Currently, the research of coded structured light 3D reconstruction technology mainly focuses on two aspects: (1) improve the accuracy and speed of 3D reconstruction, (2) address the reconstruction problem of solid surface.

In this paper, aiming at improving the accuracy of 3D reconstruction of spatial coded structured light, we mainly study structured light spatial coding algorithm, structured light decoding algorithm and system parameter calibration algorithm. The main work of this paper is as follows:

(1) We study the structure light coding technology. Focus on the problem that spatial resolution of spatial encoded pattern is relatively low, we propose an adaptive spatial structured light coding algorithm based on surface geometric features of the object. Based on the feature of fringe density proposed in this paper, the sparse and dense fringes of structured light image are determined. Based on the feedback adjustment information of the geometric projection model of object surface, the fringe spacing of structured light encoding pattern is adaptively adjusted to obtain adaptive spatial structured light coding patterns with high spatial resolution rate, realize high accuracy three-dimensional reconstruction of specific objects. The experimental results verify the effectiveness of the proposed method.

(2) We study the structure of structural light decoding technology. Aiming at the problem that the texture of the object surface and the influence of light on the structured light image lead to low decoding accuracy, we propose a color structured light decoding algorithm based on the technology of color migration. Firstly, using the color distribution of structured light coded images as prior knowledge, the structured light images captured by the camera are enhanced and de-illuminated by color migration, and the color information of structured light image stripes is restored. Secondly, a two-step accurate positioning of the color structure of light stripe center pixel sub-pixel extraction algorithm, which can accurately extract the center coordinates of the stripe, to achieve high-precision

decoding. Compared to the experimental results, the proposed algorithm improves the matching accuracy by about 5% on average compared with the Retinex algorithm. By contrasting with the feature point detection algorithm, the error rate of the proposed algorithm is about 4% lower than that of Rongqiang Yang algorithm. The experimental results verify the effectiveness of the proposed method.

(3) We study the structure light system calibration and structured light 3D reconstruction technology. Aiming at the problem of imprecise calibration of system parameters, the system calibration algorithm based on local homography matrices is proposed and a three-dimensional reconstruction system and calibration system based on spatial coding structure light are designed and implemented. Firstly, the structured light encoding pattern is projected on the calibration plate, and the global homography matrix between the projection pattern plane and the camera imaging plane is obtained by decoding. Then, the local homography matrix of each feature corner on the calibration plate is calculated, the local homography matrices are used to solve the exact pixel coordinates of the feature corners on the projection plane. Finally, the calibration system and the 3D reconstruction method based on structured light are implemented with high accuracy.

KEYWORDS: Spatial coded structured light; Self adaptive; DeBruijn; Color transfer; High precision; 3D reconstruction

目录

摘要	iii
ABSTRACT.....	iv
1 绪论	1
1.1 研究背景及意义	1
1.2 基本原理及相关技术	2
1.3 国内外研究现状	3
1.3.1 时序编码	5
1.3.2 直接编码	6
1.3.2 空间编码	7
1.4 论文主要内容及创新点	11
1.4.1 论文的主要内容	11
1.4.2 论文的主要特色及创新点	12
1.5 论文内容安排	13
2 基于几何特征的自适应结构光空间编码算法	14
2.1 DeBruijn 序列.....	15
2.2 自适应结构光空间编码算法	16
2.2.1 基于动态规划的条纹密集度特征	16
2.2.2 基于目标表面几何特征的投影模型	19
2.3 实验结果与分析	24
2.3.1 实验环境	24
2.3.2 结果对比与分析	24
2.4 本章小结	27
3 基于色彩迁移技术的彩色结构光解码算法	28
3.1 色彩迁移技术	29
3.2 彩色结构光解码算法	30
3.2.1 基于色彩迁移的彩色结构光图像增强方法	31
3.2.2 彩色条纹中心点亚像素提取方法	32
3.3 实验结果与分析	36
3.3.1 实验环境	36

3.3.2 结果对比与分析	36
3.4 本章小结	40
4 基于空间编码结构光的高精度三维重构	41
4.1 结构光系统标定	42
4.1.1 摄像机的光学模型	42
4.1.2 摄像机标定	44
4.1.3 投影仪标定	46
4.2 三维坐标计算	47
4.3 实验结果与分析	48
4.3.1 实验环境	48
4.3.2 标定结果对比与分析	49
4.3.3 三维重构结果对比与分析	51
4.4 本章小结	54
5 工作总结与展望	55
5.1 工作总结	55
5.2 进一步的研究建议	56
参考文献	57
作者简历及攻读硕士学位期间取得的研究成果	61
独创性声明	62
学位论文数据集	63

1 绪论

本章主要介绍本文的研究背景及意义、编码结构光三维重构技术目前的研究现状和基本原理，最后陈述本文的主要内容和创新点。

1.1 研究背景及意义

人类了解世界、探索世界 80%的信息是眼睛获取的视觉信息。随着现代计算机技术的快速发展，人们开始尝试让计算机也具备与人类类似的视觉功能，用摄像机代替人类的眼睛，通过摄像机捕获图像，然后用计算机对捕获的图像进行分析和理解，将理解到的高级视觉信息输出，帮助我们更快更好的认知和了解世界，由此产生了计算机视觉这门新学科^[1]。

三维重构技术是计算机视觉技术的重要分支之一，是计算机视觉和工业测量领域相结合的一个热门研究领域。其中，在工业产品快速设计、自动检测和测量、质量检测控制、3D 打印等领域，快速、准确、方便地获取物体表面三维信息的需求日益增加^[2]。

目前，结构光技术是实现物体表面三维重构最可靠而有效的技术^[3]。该技术首先通过投影仪将结构光编码图案投射到被测目标物体表面，并用摄像机对目标物体表面进行拍摄，摄像机将捕获到因目标物体表面形状导致编码图案变形的结构光图像，通过对变形的结构光图像进行解码处理，再基于三角测量原理计算得到物体表面的三维点云数据，从而实现被测物体表面的三维重构^[4]。随着科学技术的快速发展，各个领域都希望实现高速运动物体表面高精度三维重构，而要实现运动物体的三维重构，就只能使用单幅图像进行三维重构，因此基于单幅图像进行三维重构已经成为结构光技术领域一个重要的研究方向^[5]。

空间编码结构光图案利用的是颜色、形状和强度等信息进行编码，因此可以利用特征点的空间位置关系实现特征点检测和匹配，这使得基于单张图像进行三维重构成为了可能^[6]。因此，基于空间编码结构光技术实现高精度和高速度三维重构已经成为该领域的研究分支。

本论文主要研究基于 DeBruijn 序列空间编码结构光来实现高精度三维重构的关键技术和方法，分别对结构光的编码方法、结构光的解码方法和系统参数标定方法等技术进行深入研究和改进，使空间编码结构光技术实现更高的重构精度。因此，本文的研究内容具有重要的理论价值和现实意义。

1.2 基本原理及相关技术

编码结构光三维重构测量技术是一种主动式三角测量技术，该技术以激光三角测量原理为理论基础，并融合了计算机测量技术、数字图像处理技术和相机标定技术等多种技术。编码结构光三维重构测量系统主要由工业摄像机、投影仪和计算机组成，如图 1-1 所示，其基本原理是：由投影仪将结构光编码图案投影到被测物体的表面，然后摄像机在另外一个角度对结构光图像进行同步拍摄，再将捕获的结构光图像输入计算机，进行解码处理，最后再根据系统标定的结果来计算特征点的三维坐标，从而完成被测物体表面的三维重构^[7]。

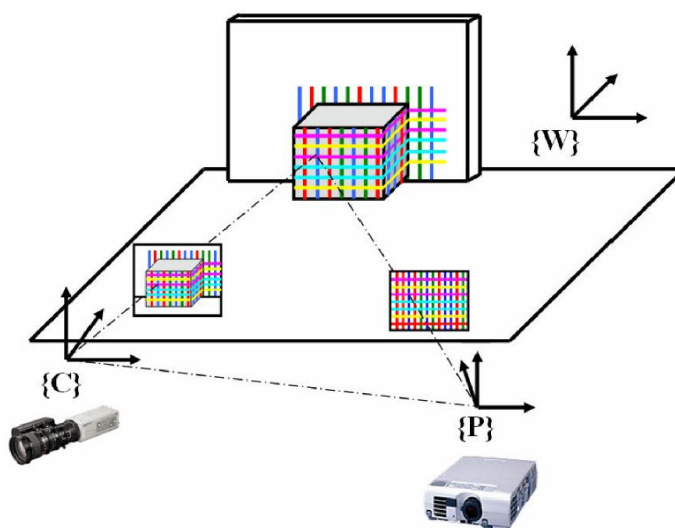


图 1-1 编码结构光三维重构系统^[7]

Figure 1-1 3D reconstruction system of coded structured light^[7]

编码结构光三维重构技术主要由图像获取、结构光编码、结构光解码、系统标定和三维坐标计算等 5 个关键技术组成。

(1) 图像获取

图像获取是三维重构系统的基础步骤，一般需要利用 CCD 或 CMOS 相机同步地对结构光图像进行实时捕获。图像获取过程中，首先需要摄像机与投影仪保持同步，投影仪投影完一张编码图案，摄像机应立即采集。此外，还需要考虑图像的质量，同时考虑相机的视野、环境光照和被测物体表面纹理的影响，为后续的高精度解码做准备。

(2) 结构光编码

目前，主要的编码方法有时序编码、直接编码和空间编码三种。时间编码优点是空间分辨率和测量精度高，但重构速度慢，不适合动态物体三维重构；直接

编码理论上分辨率也比较高,但是解码相当困难,重构的精度也不高;空间编码只需投影一幅编码图像,重构速度快,适合动态测量^[8],所以成为近年研究的热点。

(3) 结构光解码

解码主要是对摄像机捕获的结构光图像进行解码,解码的方法取决于编码的方法,不同的编码方法需要不同的解码方法。但是,不管采用什么编码方法,解码的最终目的都是建立相机平面和投影平面特征点之间的对应关系,其关键技术是特征点的提取和匹配。

(4) 系统标定

结构光系统标定的目标是计算出摄像机和投影仪内参矩阵、镜头畸变系数和两者之间相对位置的外参矩阵,三维坐标计算依赖于系统标定的结果,因此,快速且精确的标定方法是实现高精度三维重构的前提。

(5) 三维信息计算

利用解码算法得出的特征点对应关系和系统标定结果,再基于三角测量原理即可求出所有特征点的三维信息。

1.3 国内外研究现状

目前,结构光编解码技术已成为结构光三维重构技术的研究热点,其编码技术主要分为时序编码、直接编码和空间编码三类,不同的编码策略在重构速度和编码复杂度上都各具有自己的优势,表 1-1 列出了国内外学者提出的一些编码策略^[9]。

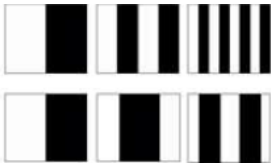
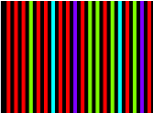


时序编码方法是按时间的先后顺序,将多张不同的编码图案投影到被测物体表面,该方法的优点在于多次投影使其具有重构精度较高的优点,但每次三维坐标的计算都需要多幅图像,所以不能对高速运动物体进行瞬时三维重构,通常也只能结合运动补偿的方法对低速运动物体进行局部表面三维重构,重构效率较低。在时序编码的发展过程中,其编码技术主要有以下几类:二值编码、n-ary 编码、相位编码和混合编码等^[10]。

直接编码法是对投影图案的颜色和强度等信息进行直接编码,因此每一个像素都有唯一的信息标志。这种编码需要很大范围的色彩空间,对硬件也需要很高的要求。此外,直接编码对光照变化和物体表面纹理比较敏感,通常只适用于光照条件较好的环境中对无特殊纹理的物体进行重构。直接编码通常可以划分为彩色编码和灰度级编码等^[11]。

空间编码法与时序编码、直接编码相比,优点在于可以该编码可以用于动态物体三维重构,它只需一幅图像按某种方式来进行编码,图案中每个特征点的码字根

据其周围邻近特征点的颜色信息、强度信息或者几何特性信息得到，因此可在复杂环境下对运动物体三维重构。空间编码可以分为：非线性编码，DeBruijn 序列编码和 M-arrays 编码等^[12]。

表 1-1 结构光编码方法^[9]Table 1-1 Structured light coding method^[9]

编码策略	类别	提出者
Time-multiplexing	Binary codes 	Posdamer et al Inokuchi et al Minou et al Trobina et al Valkenburg and Melvor Skocaj and leonardis Rocchini et al
	n-ary codes	Caspi et al Horn and kiryati
	Gray code + Phase shifting	Bergmann Sansoni et al Wiora
	Hybrid methods	Kosuke sato Hall-Holt and Rusinkieiez
Spatial Neighborhood	Non-formal codification	Maruyama and Abe Durdle et al Ito and Ishii Boyer and Kak Chen et al
	DeBruijn codification 	Hugli and Maitre Monks et al Vuylteke and Oosterlinek Salvi et al Lavoie et al Zhang et al
	M-arrays 	Morita et al Petriu et al Kiyasu et al Spielder et al Griffin et al
Direct coding	Grey levels	Carrihill and Hummel Chazan and Kiryati Hung
	Colour 	Tajinma and Iwalawa Smntny and Pajdla Geng Wust and Capson Tatsuo Sato

由于编码图案的选择和设计直接影响后续三维重构的精度，因此为了提高三维重构的精度，不同学者提出了不同的编码策略。下面分别对时序编码、直接编码和空间编码的国内外研究现状进行阐述。

1.3.1 时序编码

在过去的几十年中，国内外很多学者对时序编码进行了深入的研究，时序编码中最常见的是普通二值编码和格雷编码。如图 1-2(a)所示的普通二值编码，其码值是由时间序列上 m 个图案得到的 0 和 1 组成的数字序列，其中黑色条纹表示 0，白色条纹表示 1。Minou 等人^[13]提出了一种使用海明距离纠错码的方法，从而有效的提高了普通二值编码算法的健壮性。而在格雷编码方面，Inokuvhi 等人^[14]在普通二值编码的基础上提出了格雷编码，如图 1-2(b)所示的格雷编码，与普通二值编码不同的是格雷编码的海明距离小于 1，生成的图案条纹边界数量较少；而普通二值编码的海明距离大于 1，生成的图案条纹边界数量较多，因此格雷编码能够减少因边界检测错误带来的误差。

C.Rocchini 等人^[15]提出一种基于红色、绿色和蓝色的结构光编码图案，该算法首先按格雷编码的方式来对红色和蓝色条纹进行编码，并以绿条纹作为特征点条纹，通过红色和蓝条纹的码值确定绿色条纹的码值。该编码方式优点在于条纹定位准确，减小了误差，但不适用于动态物体的三维重构。

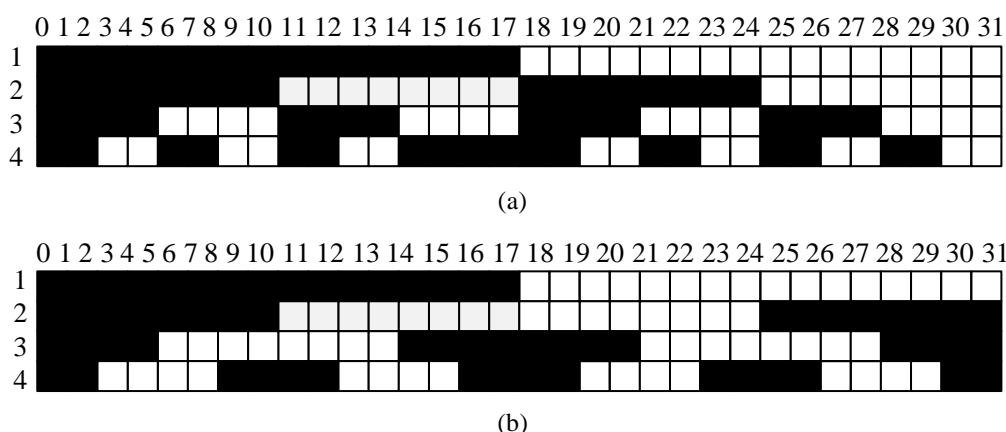


图 1-2 时间编码 (a)普通二值编码 (b)格雷码

Figure 1-2 Time-multiplexing (a)Ordinary binary code (b)Gray code

二值编码图案的优点是图像分割比较简单，计算量少，缺点是需要投射多张编码图案。如果使用更多的灰度级来编码，即使用 n 值编码技术，就能够提高编

码图案的空间分辨率，从而减少投影图案的数量。Caspi等人^[16]就提出一种彩色 n 值编码方法，该编码算法将编码图案中每一种颜色都与一个 N 值码表中元素建立唯一的映射关系，通过彩色编码图案实现了对二值编码图案的延伸。Horn等人^[17]也提出了一种 n 值编码方法，但该编码方法不是基于彩色条纹，而是基于灰度条纹。

在相位编码方面，TaoPeng等人^[18]针对正弦光栅编码图案投影到球状物体表面时，出现条纹密集的现象导致三维重构精度不高的问题，提出了一种自适应正弦光栅编码图案，对特定的球状物体有效提高图案的分辨率和重构覆盖率。

1.3.2 直接编码

在灰度直接编码研究方面，Carrihill等人^[19]提出了一个基于强度比的深度传感器系统，该系统的投影图案由灰度分布的楔形图形组成，该方法首先在测量环境下捕获一张图像，然后在均匀强度光照环境下再捕获另一张图像，通过这两张图像每个点的像素比值，找到捕获图像中像素点在编码图像中对应点的纵坐标，由于该编码方法重构时需要两幅编码图案，因此该方法也只能对静态物体进行三维重构。Wong等人^[20]也提出一种灰度直接编码，该编码方法包含特征图和纹理图，其中特征图首先由水平和竖直的直线相交形成密集的网格，然后再均匀的分布白色的圆点，如图1-3左侧的图像所示，而纹理图则由密集的条纹构成，条纹的灰度值是周期变化性变化的，如图1-3右侧的图像所示，该方法的优点在于计算复杂性较小，可以快速的获得稠密的深度图，但也不能对动态物体进行三维重构。

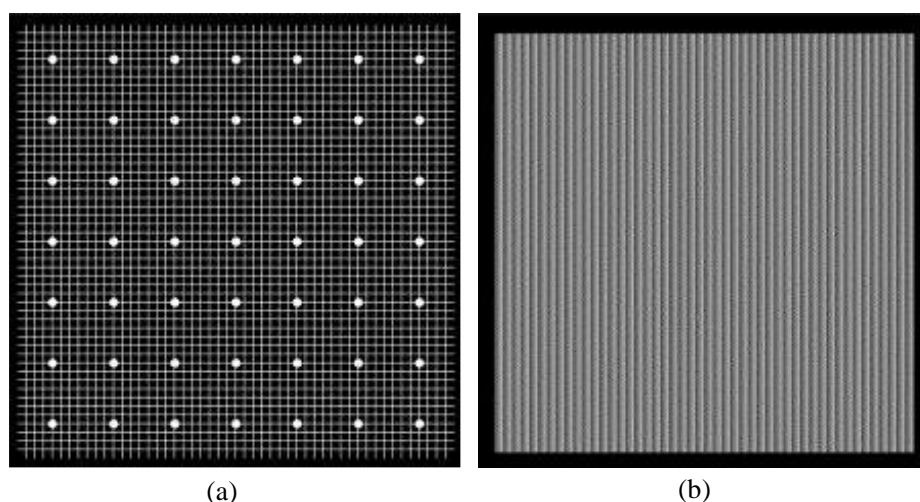


图1-3 Wong提出的编码图案^[20]

Figure 1-3 The coded pattern proposed by Wong^[20]

在彩色直接编码方法方面, Tajima等人^[21]提出一种类似于彩虹的编码图案, 该编码图案是由彩色的垂直条纹组成, 不同颜色的条纹波长不同, 因此可以投影出大量不同的光谱条纹, 并用两个不同颜色滤镜的摄像机分别捕获两张图像, 特征点的对应关系通过这两张图像像素值的比来确定。在这之后, Geng等人^[22]将相机换成了CCD相机, 并在镜头前安装一个线性可变的过滤器来对该Tajima的方法进行改进, 从而可以基于单张图像对物体表面进行三维重构, 此外, Sato等人^[23]也在Tajima的基础进行了改进, 投影图案由颜色连续变化的彩色条纹组成, 该方法利用CCD摄像机获得的图像中的彩色条纹畸变, 得到了距离的计算公式。

1.3.2 空间编码

空间编码与时间编码、直接编码不同的是它只需要投影一幅编码图案, 在解码时, 可以根据特征点邻域范围内其他特征点的编码值确定得到自己编码值。由于空间编码只需要一张投影图案, 因此能对运动的目标物体进行三维重构。

(1) 非正式编码

Boyer等人^[24]提出一种由红绿蓝三种彩色垂直条纹组成的非正式编码图案, 彩色条纹之间以黑条纹作为间隔。Durdle等人^[25]提出一种新的编码方法, 该编码图案由黑色、白色和灰的三种颜色的水平条纹组成。Chen等人^[26]提出一个结构光系统, 该在拍摄图像时, 首先将彩色条纹图案投影到物体上的, 然后从获得的立体图像对提取边缘段, 并采用了一种基于水平扫描线动态规划的全局搜索方法寻找正确的立体匹配。

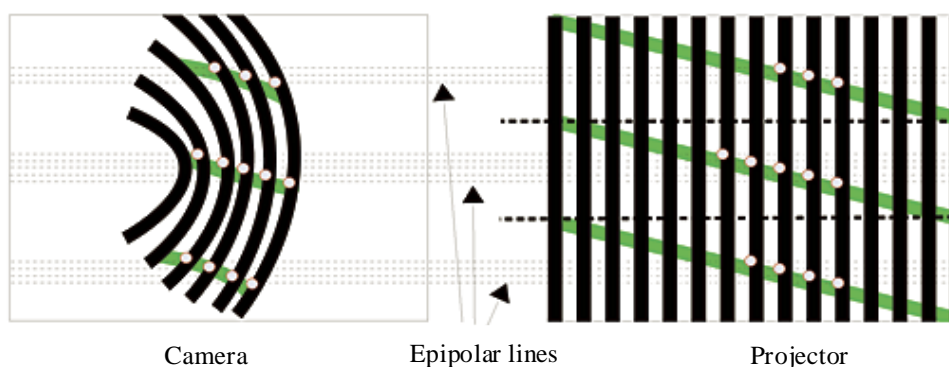


图1-4 Koninckx提出的编码图案^[27]

Fig. 1-4 The coded pattern proposed by Koninckx^[27]

2006年, Koninckx等人^[27]也提出了一种非正式的空间编码方法, 该编码图案由黑色、白色和绿色的编码条纹组成, 其中白色和黑色条纹是垂直分布的, 而绿色的条纹在水平方向有一定的倾斜角, 与黑白条纹相交, 编码图案如图1-4所示, 另外, 该自适应算法可随捕获图像的噪声程度和颜色信息, 自动调节原投影图案中彩色条纹的密度和宽度。

(2) 基于 DeBruijn 序列编码

DeBruijn 序列是由具有一定特征的伪随机码构成的序列, 可以使用一个 n 维的 Hamiltonian 或者 Eulerian 路径进行构造^[28]。一个 n 阶的窗口大小为 k 的 DeBruijn 序列长度为 n^k , 该序列可表示为 $d_0, d_1, d_2 \dots d_{n^k-1}$, 在该序列中, 每个子窗口大小为 k 的子序列在整个序列中出现且只出现一次。

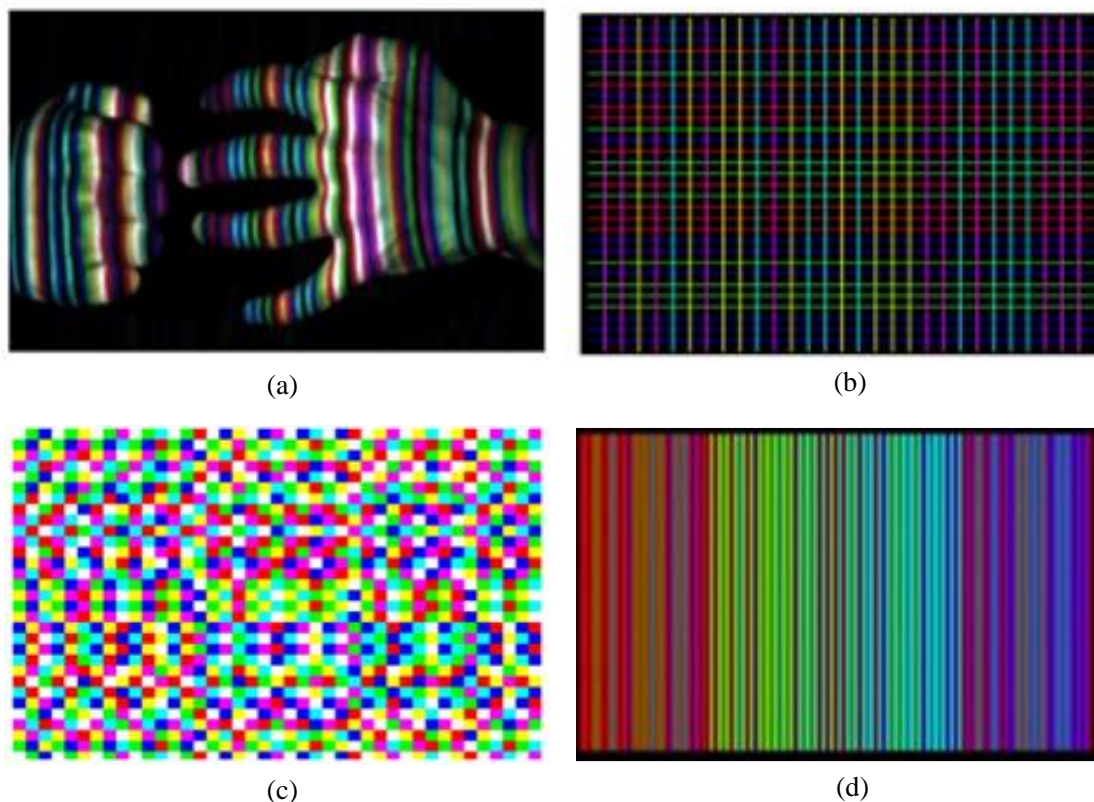


图1-5 (a)Zhang编码图案^[29] (b)Salvi编码图案^[30] (c)Chen编码图案^[31] (d)Pages编码图案^[32]

Figure1-5 (a)The coded pattern proposed by Zhang^[29] (b)The coded pattern proposed by Salvi^[30]
(c)The coded pattern proposed by Chen^[31] (d)The coded pattern proposed by Pages^[32]

2002 年, Zhang 等人^[29]提出了在一个维度方向的 DeBruijn 序列编码图案, 如图 1-5(a)所示, 该方法唯一性窗口大小为 3, 由 8 种不同颜色排列组成了含有 125 根

彩色条纹编码图案。而 Salvi 等人^[30]提出了在两个方向进行编码的设计策略, 编码图案如图 1-5(b)所示, 该编码策略的窗口大小为 3, 由 3 种颜色组成, 整个编码图案的编码特征点数为 29×29 。Chen 等人^[31]基于 DeBruijn 随机序列, 提出由六种颜色方块组成的编码光带, 编码图案如图 1-5(c)所示。Pages 等人^[32]也基于 DeBruijn 随机序列, 设计出了如图 1-5(d)所示的编码图案。

近年来, 日本的Yoshinori Oki等人^[33]基于伪随机序列设计的彩色条纹编码图案实现了运动物体全表面重构, 编码图案如图1-6左侧的图像所示。该系统使用六个投影仪和六个相机布置在被测物体的周围, 测量系统如图1-6右侧的图像所示, 在多投影仪多相机环境下相邻投影仪之间的编码图案在物体表面会产生模式重叠效应, 而基于伪随机序列的彩色条纹编码图案可以在解码阶段对每个像素点求方向导数来实现重叠图案的分离, 因此该编码模式能实现运动物体的全表面重构。

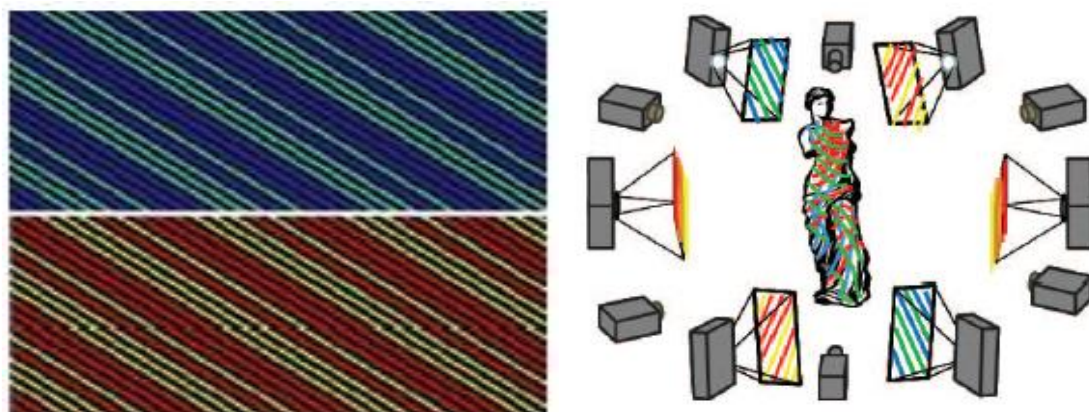


图1-6 Yoshinori Oki提出的彩色编码模式和动态物体全表面三维重构系统^[33]

Figure 1-6 The color coded pattern proposed by Yoshinori Oki and the full surface 3D reconstruction system for dynamic objects^[33]

(3) 基于 M 阵列编码

Griffin 等人^[34]提出一种 M 阵列编码图案, 该编码图案由 4 个不同的黑色几何图形组成, 编码的大小为 18×66 , 图 1-7(a)所示是编码图案中一个子矩阵对应的几何图形。Spoelder 等人^[35]提出一个大小为 65×63 的编码图案, 由二值 M 阵列棋盘格生成, 编码图案如图 1-7(b)所示, M 阵列元素放在白色格子里, 并黑色格子把白色的格子分隔开, 提高图像的分割精度。Morano 等人^[36]提出了一种由灰色的菱形组成的 M 阵列编码图案, 改编码算法能够根据不同的海明距离设计出不同的编码图案, 图 1-7(c)所示为 Morano 提出的阵列编码图案。

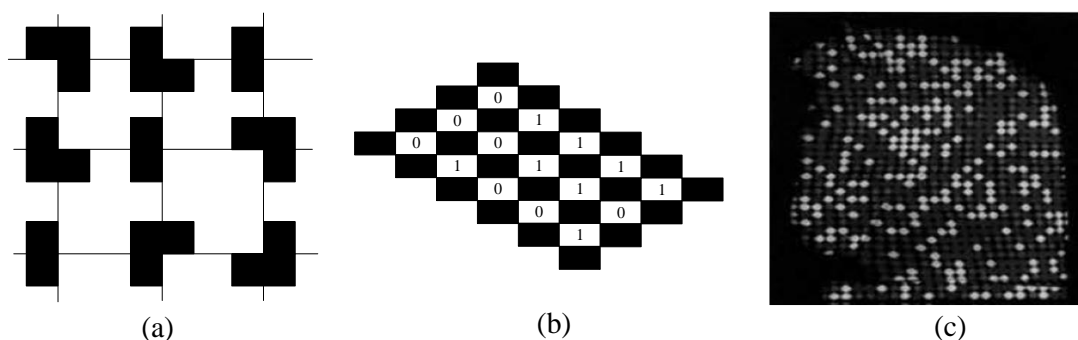


图 1-7 (a)Griffin 编码图案^[34] (b)Spoelder 编码图案^[35] (c)Morano 编码图案^[36]

Figure 1-7 (a)The coded pattern proposed by Griffin^[34] (b)The coded pattern proposed by Spoelder^[35] (c)The coded pattern proposed by Morano^[36]

2007 年, Chen 等人^[37]提出了全新的 M 阵列编码图案, 该编码图案由彩色正方形方格编码而成, 如图 1-8(a)所示, 该编码方法的优点是空间分辨率较高, 具有较强的鲁棒性, 也适用于动态物体的三维重构, 不足在于颜色的种类太多, 而且容易受到物体表面颜色的干扰, 容易导致解码时颜色识别错误产生特征点匹配误差。针对以上的不足, Albitar 等人^[38]提出一种由 3 种黑白图形元素组成编码图案, 如图 1-8(b)所示, 该编码图案的颜色和形状差异性大, 并且每个邻域的海明距离都大于 3, 因此能够有效的降低特征点匹配的误差率。

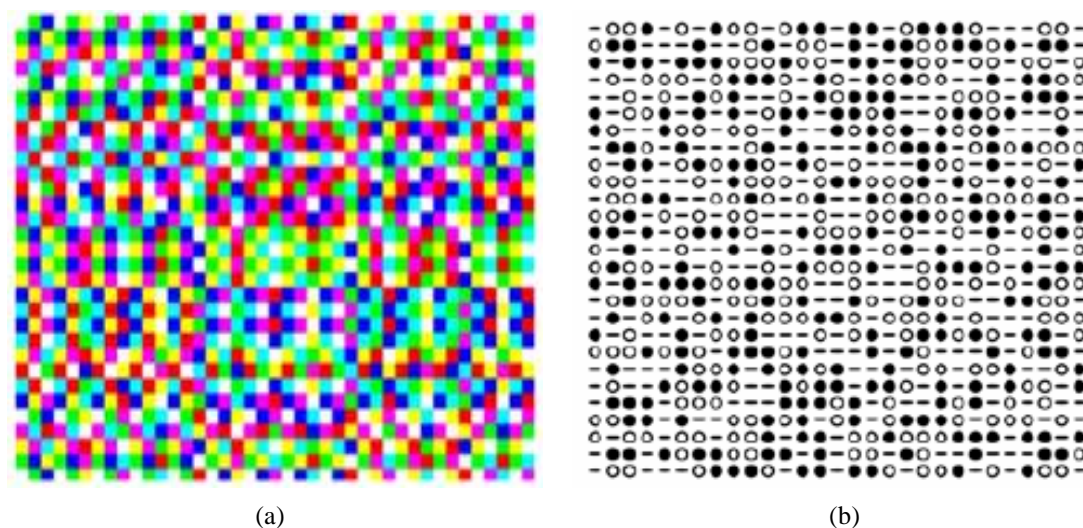


图 1-8 (a)Chen 提出的编码图案^[37] (b)Albitar 提出的编码图案^[38]

Figure 1-8 (a)The coded pattern proposed by Chen^[37] (b)The coded pattern proposed by Albitar^[38]

Zhan Song 等人^[39]基于 M 阵列空间编码, 以四种彩色几何菱形作为特征基元

来生成 M 阵列编码图案, 该编码图案的唯一性子窗口为 2×3 , 整个编码图案的阵列大小为 65×63 , 如图 1-9(a)所示。此外, 作者还对这种编码图案提出了相应的特征基元检测算法, 在运动的人脸上实现了较高的重构精度。2015 年, Haibo Lin 等人^[40]在此编码的基础上又进行了改进, 即在原来的基元中加入几何特征, 在部分大菱形方块上加入白色小菱形, 如图 1-9(b)所示, 整个编码图案的阵列大小虽然还是 65×63 , 但是唯一性子窗口的变为 2×2 。

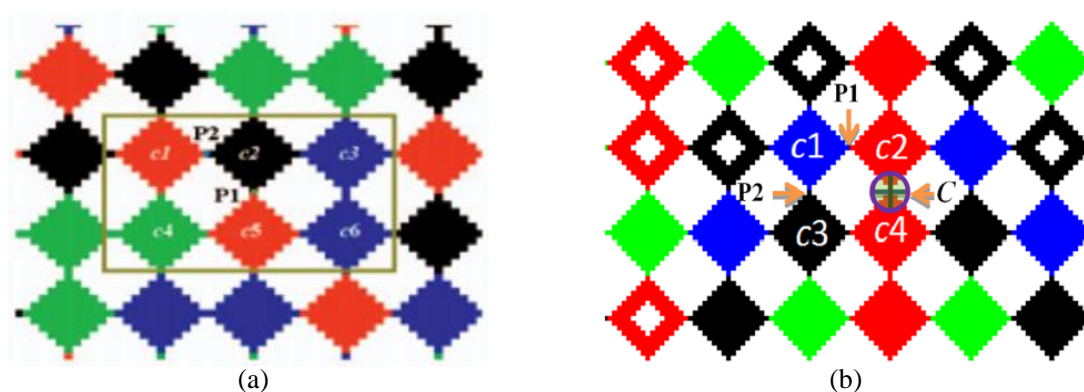


图 1-9 (a)Haibo Lin 编码图案^[39] (b)Zhan Song 编码图案^[40]

Figure 1-9 (a)The coded pattern proposed by Haibi Lin^[39] (b)The coded pattern proposed by Zhan Song^[40]

1.4 论文主要内容及创新点

目前, 提高三维重构的精度和速度以及实现运动物体全表面立体重构是编码结构光技术的研究热点。在对编码结构光技术的国内外研究现状进行综合研究性学习和综述后, 本文以基于 DeBruijn 序列空间编码为主要研究内容, 以提高单张结构光图像进行三维重构的精度为主要目标, 分别在结构光的编码算法、结构光的解码算法和结构光系统标定及三维坐标计算等方面进行研究与创新。

1.4.1 论文的主要内容

编码结构光三维重构的精度主要受三个方面的因素影响, 一是结构光编码图案的空间分辨率, 空间分辨率与特征基元的形状、颜色和强度成正比; 特征基元的形状、颜色和强度的数量越多, 空间分辨率越高, 但是会加大解码的难度; 二是结构光的解码算法, 需要根据编码算法设计相对应的解码算法, 解码过程中特征点检测和匹配不准确也会对三维重构的结果造成很大的误差; 三是系统参数标定的结

果, 计算特征点的三维坐标直接依赖于标定的结果, 如果参数标定不准将会严重影响三维重构的结果。因此, 为了提高三维重构的精度, 本文针对以上三个方面展开了深入的研究。

(1) 在结构光编码方面, 针对具体的应有场合, 提出一种基于几何特征的自适应结构光编码算法。空间编码与传统的时间编码相比, 能在多相机多投影仪的条件下实现运动物体的全表面重构, 但存在分辨率低的问题, 因此本文提出一种基于几何特征的自适应结构光空间编码算法。首先基于本文提出的条纹密集度特征, 计算捕获结构光图像中条纹的密集程度, 若密集程度与设定的阈值不符, 则根据目标表面几何特征投影模型的反馈信息, 对初始投影图案的条纹间距进行不断迭代调节, 直至捕获的结构光图像密集度特征满足设定的阈值, 最后获得高分辨率的自适应结构光空间编码图案, 实现特定物体高精度三维重构。

(2) 在结构光解码方面, 针对物体表面纹理和光照的影响导致解码精度不高的问题, 提出一种基于色彩迁移技术的结构光解码算法。首先, 以结构光编码图案的颜色分布为先验知识, 利用色彩迁移的方式对相机捕获的结构光图像进行增强和去光照处理, 还原结构光图像条纹的颜色信息; 其次, 提出了两步精确定位的彩色结构光图像条纹中心点亚像素提取算法, 继而准确提取条纹的中心坐标, 实现高精度解码。

(3) 在基于空间编码结构光的高精度三维重构方面, 设计并实现了一套基于 DeBruijn 序列空间编码结构光的高精度三维重构系统。首先基于本文的编解码算法实现结构光的高精度编码和解码, 然后利用格雷编码和局部单应性矩阵求解标定板特征角点在投影仪平面上的精确位置坐标, 再基于张正友及系统标定原理实现投影仪和结构光系统的高精度标定, 最后基于高精度编解码结果和高精度系统标定结果实现目标表面的高精度三维重构。

1.4.2 论文的主要特色及创新点

(1) 针对等间距 DeBruijn 序列彩色结构光编码图案对曲面物体投影时出现条纹稀疏和密集的现象, 导致三维重构精度不高的问题, 本文提出了一种基于被测物体表面几何特征的自适应结构光空间编码算法, 能针对特定的被测物体实现高分辨率编码。

(2) 针对物体表面纹理和光照的影响导致解码精度不高的问题, 本文提出了一种基于色彩迁移技术的彩色结构光解码算法, 该解码算法以编码图案的色彩分布作为先验知识, 用色彩迁移的方法对相机捕获的结构光图像进行增强和去光照处理, 还原结构光图像条纹的颜色信息。此外, 还提出了两步精确定位的彩色结构光

图像条纹中心点亚像素提取算法,继而准确提取条纹的中心坐标,实现高精度解码。

(3) 针对系统参数标定精度不高导致最终三维重构精度降低的问题,本文以张正友标定理论和相机、投影仪成像平面局部单应性理论为基础,设计并实现了一套高精度相机、投影仪标定系统和 DeBruijn 序列空间编码结构光三维重构系统,通过重构结果验证本文算法的有效性。

1.5 论文内容安排

本文主要探讨基于空间编码结构光三维重构的关键技术,并对影响三维重构精度的几个方面进行深入的研究与创新,主要的内容安排如下:

第一章:绪论部分。本章简要分析了编码结构光三维重构的基本原理和相关技术,并对编码结构光三维重构的国内外研究现状进行讨论,最后对本文的创新点进行简要的概括。

第二章:提出一种基于几何特征的自适应结构光空间编码算法。该算法首先基于本文提出的条纹密集度特征,计算捕获结构光图像的条纹的密集程度,若密集程度与设定的阈值不符,则基于目标表面几何特征投影模型的反馈信息,对初始投影图案的条纹间距进行不断迭代调节,然后将调整后的结构光图案投影到物体表面,直至捕获的结构光图像密集度特征满足设定的阈值,最后获得高分辨率的自适应结构光空间编码图案,实现特定物体高精度三维重构。

第三章:提出一种基于色彩迁移技术的彩色结构光解码算法。该算法首先以结构光编码图案的颜色分布为先验知识,利用色彩迁移的方式对相机捕获的结构光图像进行增强和去光照处理,还原结构光图像的条纹颜色信息;其次,提出了两步精确定位的彩色结构光图像条纹中心点亚像素提取算法,继而准确提取条纹的中心坐标,实现高精度解码。

第四章:研发高精度系统标定系统和空间编码结构光高精度三维重构系统。该系统首先基于本文的编解码算法实现结构光的高精度编码和解码,然后利用格雷编码和局部单应性矩阵求解标定板特征角点在投影仪投影平面上的精确位置坐标,再基于张正友及系统标定原理实现投影仪和结构光系统的高精度标定,最后基于高精度编解码结果和高精度系统标定结果实现目标表面的高精度三维重构。

第五章:工作总结与展望。本章主要对提出的算法和研究的成果进行全面总结,并提出了其中的不足和下一步的工作计划及展望。

2 基于几何特征的自适应结构光空间编码算法

结构光三维重构技术中结构光编码图案的设计是关键技术之一，低分辨率的结构光编码图案直接影响着后续特征基元的识别和匹配精度，最后导致较低的三维重构精度，因此设计一种具有高分辨率的结构光编码图案对提高三维重构精度至关重要。空间编码图案中每个特征点的码值可以根据其周围邻近特征点的颜色信息或者几何特性信息得到，因此可在复杂环境下对运动物体进行三维重构^[41]。

目前，基于伪随机序列的彩色条纹编码图案条纹间距都是一致的，将这样等间距的彩色条纹编码图案投影到曲面变化剧烈的物体表面时，比如球体表面，由于物体局部表面的法向量和投影仪主光轴夹角不断变化，导致相机捕获的图像出现条纹密集和稀疏的现象，密集条纹将会导致条纹颜色串扰问题，从而降低特征点颜色识别和匹配的精度；而稀疏条纹将会导致较低的特征点密度，从而无法获得稠密的点云数据，也无法实现高精度三维测量。针对这一问题，本章提出一种结合特定物体表面几何特征的自适应结构光空间编码算法，避免编码图案投影时出现条纹密集和稀疏的现象，从而提高投影图案的空间分辨率。算法流程如图 2-1 所示，虚线部分为本章提出的自适应结构光空间编码算法。

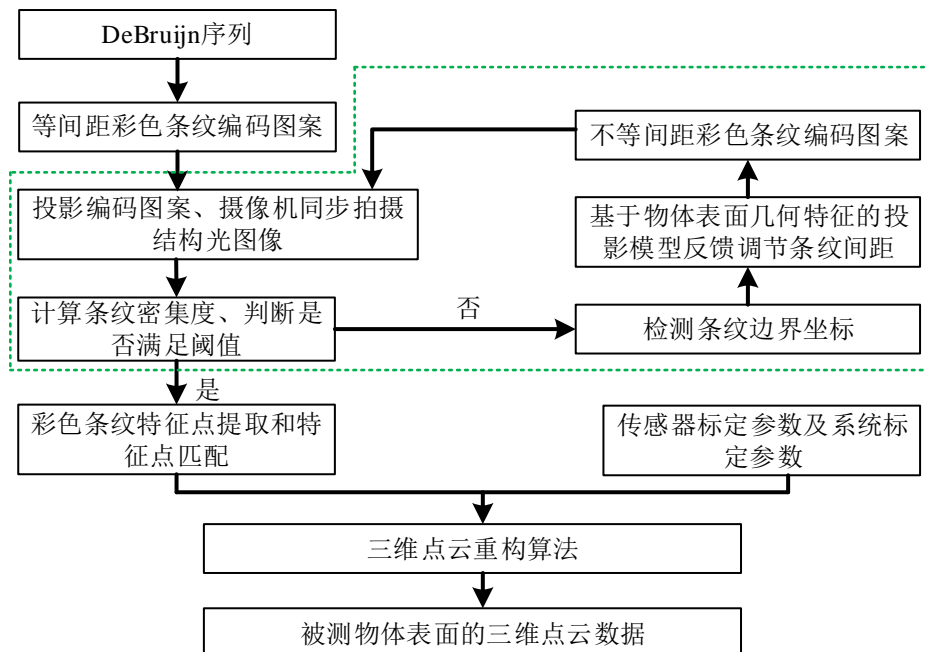


图 2-1 自适应结构光编码三维重构原理图

Figure 2-1 Schematic diagram of three-dimensional reconstruction based on adaptive structured light coding

本章提出的基于几何特征的自适应结构光空间编码算法，首先根据 DeBruijn 序列和选定的条纹颜色生成等间距的 Monks 编码图案^[42]，将此编码图案投影到被测物体表面，并用高速摄像机进行同步捕获，然后计算捕获结构光图像的条纹密集度特征并与设定的阈值进行比较，若不满足阈值，则基于物体表面几何特征的投影模型迭代反馈调节编码图案的条纹间距，直至重新投影后捕获的结构光图像条纹密集度特征满足设定的阈值，从而获得空间分辨率更高的自适应空间编码图案。

2.1 DeBruijn 序列

自适应编码图案和 Monks 编码图案的编码策略都是根据 DeBruijn 序列来确定彩色条纹的分布。DeBruijn 序列是伪随机序列编码的一种形式，特点是具有预先确定性和随机性。对于一个窗口大小为 m 的 n 元 DeBruijn 序列，记为 $B(n, m)$ ，是将 n 个不一样的符号组合成一个长度为 n^m 的符号序列，在生成的符号序列中，一个长度为 m 的子序列在整个序列中只能出现一次，因为子序列只出现一次，因此可根据子序列中包含的元素确定子序列在整个序列中出现的位置^{[43][44]}。DeBruijn 序列可通过遍历 DeBruijn 图的欧拉回路和哈密顿回路来生成^[45]，假设以 $n=2$ 的 0 和 1 基元生成子序列长度 $m=3$ 的 DeBruijn 序列，记为 $B(2, 3)$ ，则 DeBruijn 图的顶点集合为由 0 和 1 构成的长度为 3 的所有可能组合，即顶点集合 $v = \{000, 001, 010, 100, 011, 101, 110, 111\}$ ，一共八个顶点，记为 $v^1, v^2 \dots v^8$ ；对于边集合，如果 v^i 的第 2 到第 m 个数值序列与 v^j 的第 1 个到第 $m-1$ 个数值序列完全相同，则 v^i 与 v^j 之间存在一条边，边的权重为 v^i 的第 m 个数的值。根据以上规则得到顶点集合和边集合之后构造 DeBruijn 图，如图 2-2 所示，从任意顶点开始对图 2-2 进行欧拉回路遍历，遍历过程中得到的边权值序列就是 DeBruijn 序列，如图 2-2 红色箭头指示的回路，最后得到其中一个 DeBruijn 序列为： $B(2, 3) = 11101000$ 。

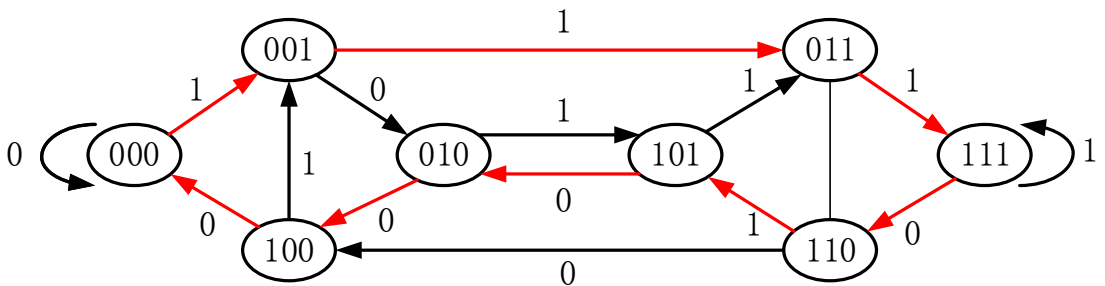


图 2-2 DeBruijn 序列生成图

Figure 2-2 Generating DeBruijn sequence diagram

此外,在彩色结构光编码中,条纹的颜色种类的选择、颜色数目的确定至关重要。在颜色种类的确定上,选择受被测物体表面纹理影响较少且易于进行边缘检测和特征基元提取的颜色,从而提高解码的精度。在颜色数目的确定上,颜色数目不宜过多,因为颜色数目过多将降低颜色之间的区分度,增加了颜色识别的难度。因此本文采用4种颜色作为基元,4种颜色RGB三通道归一化后可分别表示为(1,0,0)、(0.5,1,0)、(0,1,1)和(0.5,0,1),并将唯一性窗口设置为3,根据DeBruijn图来生成一个长度为64的 $B(4,3)$ 序列,最后基于此 $B(4,3)$ 序列生成的初始Monks彩色条纹编码图案如图2-3所示。



图 2-3 初始 Monks 编码图案

Figure 2-3 Initial Monks coding pattern

2.2 自适应结构光空间编码算法

本节提出的自适应空间编码算法,首先通过本章提出的条纹密集度特征来判断捕获的结构光图像是否存在条纹密集和稀疏的现象,若存在,则基于本章提出的目标表面几何特征投影模型不断迭代反馈调节编码图案的条纹间距,生成与物体表面相适应的结构光编码图案,从而实现目标物体表面高精度的三维重构。

2.2.1 基于动态规划的条纹密集度特征

对于摄像机捕获的结构光图像,条纹密集区域会出现颜色串扰和条纹叠加的现象,特征点匹配的精度较低,而且特征点之间的欧式距离较小;而条纹稀疏区域颜色之间相互干扰较小,因此特征点检测和匹配的精度较高,特征点之间的欧式距离较大。基于结构光图像的以上两个特性,本章提出以特征点匹配相似度和特征点欧式距离作为条纹密集度特征的因子。首先,检测结构光图像显著性区域中心位置的条纹特征点序列,然后从左到右以滑动窗口的方式计算窗口内特征点序列的匹配相似度和欧式距离,通过加权归一化计算后得到当前特征点的密集度特征,滑

动窗口遍历结束后即可得到整个条纹序列所有特征点的密集度特征，从而得到结构光图像的条纹密集度特征。

条纹密集度特征中的特征点匹配相似度因子是结构光图像显著性区域中心位置的特征点序列和编码图案特征点序列之间的最优匹配。假设原等间距 **Monks** 编码图案的特征点序列为 $Q = (q_0, q_1 \dots q_{N-1})$ ，摄像机捕获结构光图像上显著性区域中心位置提取的特征点序列为 $E = \{e_0, e_1 \dots e_{M-1}\}$ ， N 和 M 为特征点数量。令序列 Q 中任意特征点为 $q_j = (q_j^r, q_j^g, q_j^b)$ ，其中 $(q_j^r, q_j^g, q_j^b) \in \{-1, 0, 1\}$ ；令序列 E 中任意特征点为 $e_i = (e_i^r, e_i^g, e_i^b)$ ，其中 $(e_i^r, e_i^g, e_i^b) \in [-1, 1]$ ，那么特征点匹配就是序列 Q 和序列 E 之间进行特征点对应匹配，用 ϕ 表示序列 Q 和序列 E 之间的全局匹配，定义如式(2-1)所示：

$$\phi = \left\{ \begin{pmatrix} j_1 \\ i_1 \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} j_2 \\ i_2 \end{pmatrix} \dots \begin{pmatrix} j_k \\ i_k \end{pmatrix} \right\} \quad (2-1)$$

在式(2-1)中， k 为匹配对数， $(j_k, i_k)^T$ 表示的是编码图案特征点 q_{j_k} 和捕获的结构光图像特征点 e_{i_k} 之间的匹配，本文利用动态规划算法找到构成最优路径的匹配对，使得全局匹配 ϕ 达到最优^[46]，即可得到特征点序列之间的最优匹配。在进行全局匹配 ϕ 查找的过程中，用一致性函数来衡量匹配对 (j, i) 中的特征点 q_j 和特征点 e_i 的一致性，那么整个序列的匹配就是 ϕ 中每一对匹配一致性之和，定义如式(2-2)所示：

$$\sigma(\phi) = \sum_{h=1}^k \text{score}(q_{j_h}, e_{i_h}) \quad (2-2)$$

因此，最优全局匹配即是所有全局匹配函数 ϕ 的最大值 $\phi^* = \arg \text{Max}\{\sigma(\phi)\}$ ，如式(2-3)所示：

$$\text{score}(q, e) = \min_{c \in \{r, g, b\}} \{\text{consistency}(q^c, e^c)\} \quad (2-3)$$

式(2-3)中的 $\text{consistency}(q^c, e^c)$ 一致性函数分别衡量特征点 q 和特征点 e 在三个颜色通道 $\{r, g, b\}$ 的一致性，函数的取值范围为 $[-1, 1]$ 。由于 $q^c \in \{-1, 0, 1\}$ ，而 e^c 的范围为 $[-1, 1]$ ，因此，可分别用三个一致性函数分别表示 e^c 与 $q^c = 1$ 、 e^c 与 $q^c = 0$ 和 e^c 与 $q^c = -1$ 的一致性，函数定义如式(2-4)所示：

$$\begin{cases} \text{consistency}(1, e^c) = f(e^c/\beta; -1; 1) \\ \text{consistency}(0, e^c) = f(1 - e^c/\beta; -1; 1) \\ \text{consistency}(-1, e^c) = f(1 - e^c/\beta; -1; 1) \end{cases} \quad (2-4)$$

其中， $0 \leq \beta \leq 1$ 作为阈值权重因子，式(2-4)中的函数定义为如式(2-5)所示：

$$f(x, x_0, x_1) = \begin{cases} x_0 & \text{if } x < x_0 \\ x & \text{if } x_0 < x < x_1 \\ x_1 & \text{if } x_1 < x \end{cases} \quad (2-5)$$

另外，式(2-4)中定义的三个一致性函数图像如图 2-4 所示：

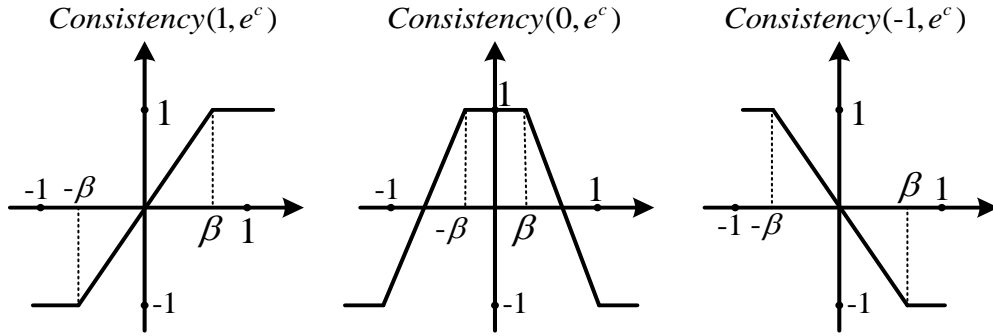


图 2-4 Consistency 函数图像

Figure 2-4 Consistency function diagram

通过式(2-1)至(2-5)完成全局匹配函数的定义后，依据动态规划思想找到全局匹配函数 $\sigma(\phi)$ 的最大值，其所对应的特征点匹配对即为最优的特征点匹配。用 $G_{j,i}$ 表示二维表 $[0, j] \times [0, i]$ 中的子路径， $\phi_{j,i}^*$ 表示子路径 $G_{j,i}$ 的全局最优子路径，按照动态规划的思想构造 $\phi_{j,i}^*$ 使其达到最优。在构造 $\phi_{j,i}^*$ 时通常存在以下三种情况：在子路径 $G_{j-1,i-1}$ 中 $\phi_{j-1,i-1}^*$ 已达到最优，然后加入匹配点 (j, i) 使得在 $G_{j,i}$ 中 $\phi_{j,i}^*$ 达到最优，或者是选取匹配点 $(j-1, i)$ 构成子路径 $G_{j-1,i}$ ，使得 $\phi_{j-1,i}^*$ 达到最优，再或者是选取匹配点 $(j, i-1)$ 构成子路径 $G_{j,i-1}$ ，使得 $\phi_{j,i-1}^*$ 达到最优。因此， $\sigma(\phi_{j,i}^*)$ 的递归计算如式(2-6)所示：

$$\sigma(\phi_{j,i}^*) = \begin{cases} 0 & \text{if } j=0 \text{ or } i=0 \\ \max \begin{cases} \sigma(\phi_{j-1,i-1}^*) + \text{score}(q_j, e_i) \\ \sigma(\phi_{j-1,i}^*) \\ \sigma(\phi_{j,i-1}^*) \end{cases} & \\ \text{other} & \end{cases} \quad (2-6)$$

为了计算结构光图像的条纹密集度特征，首先检测出显著性区域中心位置的特征点序列 $E = \{e_0, e_1 \dots e_M\}$ ，然后根据检测到的特征点序列 $E = \{e_0, e_1 \dots e_M\}$ ，从 e_0 开始分别取每个特征点 e_i 的 k 邻域子序列 $e = \{e_i, e_{i+1} \dots e_{i+k-1}\}$ ，如图 2-5 所示的特征点序列，再基于式(2-2)的动态规划算法将子序列 e 与投影模式特征点序列 Q 进行最优特征点匹配，分别计算出该匹配的相似度因子 $s(i)$ 和欧式距离因子 $d(i)$ ，最后将其归一化后得到该特征点 e_i 的密集度特征 $F(i)$ ，其定义如式(2-7)所示。

$$F(i) = a \cdot \frac{s(i)}{k} + b \cdot \frac{d(i) \cdot M}{D \cdot k} \quad (2-7)$$

在式(2-7)中， $s(i)$ 为该子序列 $e = \{e_i, e_{i+1} \dots e_{i+k-1}\}$ 和序列 Q 的最优匹配，定义为

特征点 i 的匹配相似度因子，其定义如式(2-9)所示； $d(i)$ 为子序列 $e = \{e_i, e_{i+1} \dots e_{i+k-1}\}$ 中所有相邻特征点之间欧式距离之和，定义为特征点 i 的欧式距离因子，其定义如式(2-8)所示， D 为序列 $E = \{e_0, e_1, e_2 \dots e_{M-1}\}$ 中所有相邻特征点之间的欧式距离之和， M 为序列 $E = \{e_0, e_1, e_2 \dots e_{M-1}\}$ 的特征点个数， k 为子序列 $e = \{e_i, e_{i+1} \dots e_{i+k-1}\}$ 的特征点个数， a 和 b 分别为相似度因子和欧式距离因子的权重。

$$d(i) = \sum_{h=i}^{i+k-2} |(u_h, v_h) - (u_{h+1}, v_{h+1})| \quad (2-8)$$

$$s(i) = \sum_{h=i}^{i+k-1} \text{score}(q_h, e_h) \quad (2-9)$$

其中， $\text{score}(q_h, e_h)$ 的定义为如式(2-3)所示， $|(u_h, v_h) - (u_{h+1}, v_{h+1})|$ 表示的是 (u_{h+1}, v_{h+1}) 和 (u_h, v_h) 之间的欧式距离。

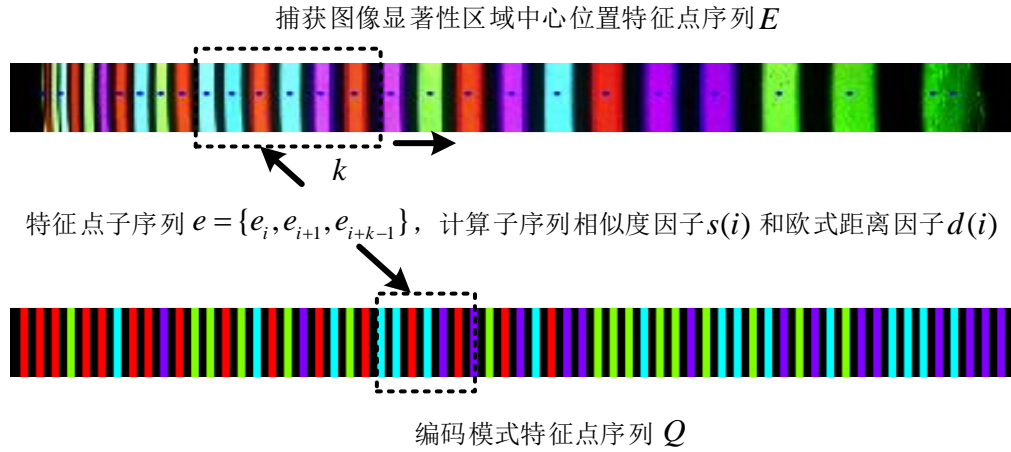


图 2-5 滑动窗口特征点匹配

Figure 2-5 Feature point matching of sliding window

如图 2-5 所示，完成当前特征点 e_i 密集度特征的计算后，将邻域窗口向右移动到下一个特征点 e_{i+1} ，再计算特征点 e_{i+1} 的密集度特征。当邻域大小为 k 的滑动窗口从左到右遍历特征点序列 E ，并计算每个特征点的密集度特征，即可获得结构光图像目标区域中心位置所有条纹的密集度特征。

2.2.2 基于目标表面几何特征的投影模型

自适应结构光空间编码是利用被测物体表面几何特征作为反馈信息，不断反馈调节结构光编码图案的条纹间距，直至摄像机捕获的结构光图像条纹密集度特征符合设定的阈值，从而获得条纹间距不一致的自适应结构光空间编码图案。本文

以半径为 r 的球体作为测量目标,首先理论分析摄像机捕获的结构光图像条纹间距与编码图案条纹间距、球状物体表面几何特征以及摄像机、投影仪和被测物体相对位置之间的函数关系,建立基于目标表面几何特征的投影模型,然后基于此模型不断迭代反馈调节编码图案的条纹间距,最后获得自适应结构光空间编码图案。

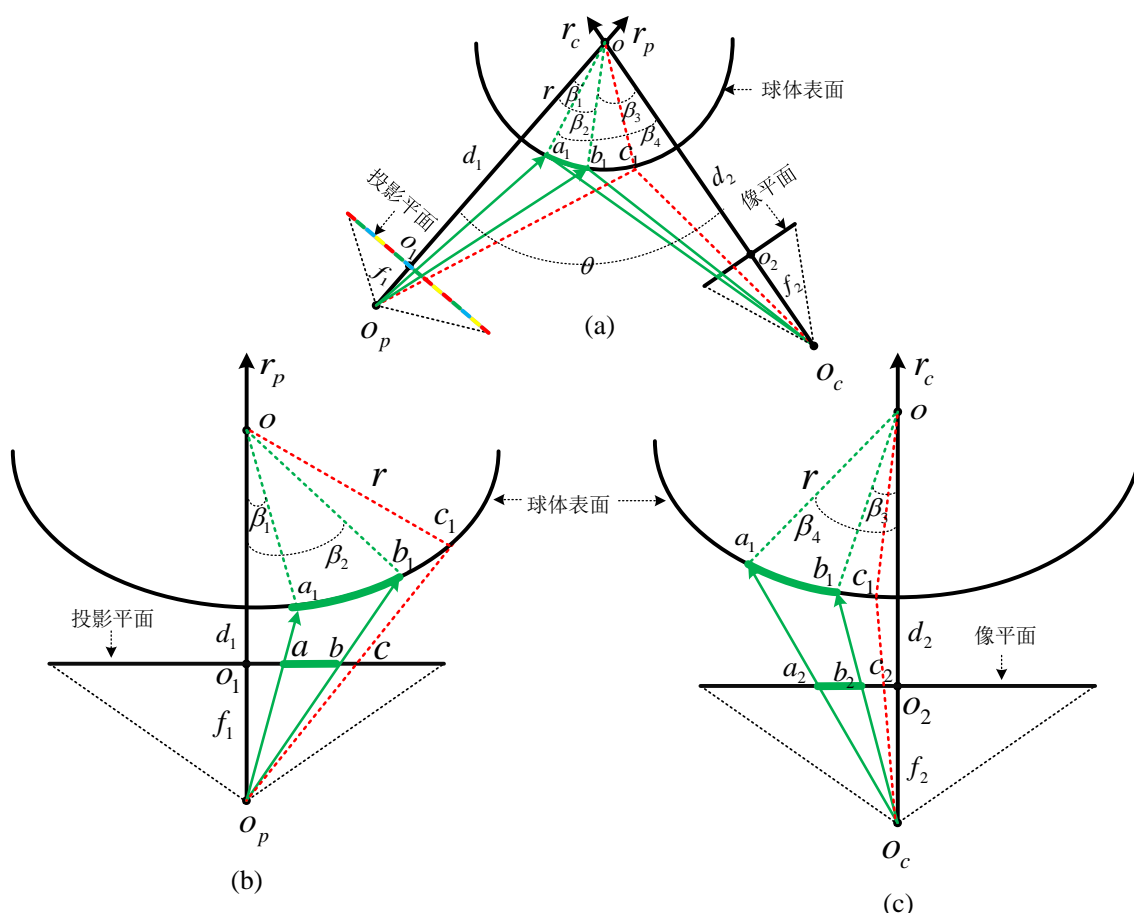


图 2-6 (a)摄像机、投影仪和被测物体相对位置关系示意图 (b)投影仪投影编码图案示意图 (c)摄像机捕获结构光图案示意图

Figure 2-6 (a)A schematic diagram of the relative position of a camera, a projector and a measured object (b)Schematic diagram of projector projection pattern (c)Schematic diagram of camera capture structure light image

如图 2-6(a)所示,投影仪、摄像机和被测球体之间的相对位置成三角关系,投影仪和摄像机的主光轴 r_p 和 r_c 都经过球体的球心 o , 主光轴之间的夹角为 θ , 两者的光心距离球心 o 的距离分别为 $oo_p = d_1$ 和 $oo_c = d_2$, 焦距分别为 f_1 和 f_2 。图 2-6(b)是图 2-6(a)左侧投影仪投影编码图案的放大示意图,如图 2-6(b)所示,假设其中一

条彩色条纹 ab 投影到球体表面的 a_1 点和 b_1 点，其法向量分别与摄像机主光轴 r_p 的夹角分别为 β_1 和 β_2 ，在摄像机的像平面上成像线段为 a_2b_2 。图 2-6(c)是图 2-6(a)右侧摄像机捕获结构光图像的放大示意图，如图 2-6(c)所示，在摄像机成像模型中，主光轴与像平面是垂直的，因此在 $\square a_2o_2o_c$ 和 $\square b_2o_2o_c$ 中满足式(2-10)和式(2-11)

$$\tan(\angle a_2o_2o_c) = \frac{|a_2o_2|}{|o_2o_c|} = \frac{|a_2o_2|}{f_2} \quad (2-10)$$

$$\tan(\angle b_2o_2o_c) = \frac{|b_2o_2|}{|o_2o_c|} = \frac{|b_2o_2|}{f_2} \quad (2-11)$$

由式(2-10)和式(2-11)以及三角函数关系得：

$$\sin(\angle a_2o_2o_c) = \frac{\pm \tan(\angle a_2o_2o_c)}{\sqrt{1 + \tan(\angle a_2o_2o_c)^2}} = \pm \frac{|a_2o_2|}{\sqrt{f_2^2 + |a_2o_2|^2}} \quad (2-12)$$

$$\cos(\angle a_2o_2o_c) = \frac{\pm 1}{\sqrt{1 + \tan(\angle a_2o_2o_c)^2}} = \pm \frac{f_2}{\sqrt{f_2^2 + |a_2o_2|^2}} \quad (2-13)$$

$$\sin(\angle b_2o_2o_c) = \frac{\pm \tan(\angle b_2o_2o_c)}{\sqrt{1 + \tan(\angle b_2o_2o_c)^2}} = \pm \frac{|b_2o_2|}{\sqrt{f_2^2 + |b_2o_2|^2}} \quad (2-14)$$

$$\cos(\angle b_2o_2o_c) = \frac{\pm 1}{\sqrt{1 + \tan(\angle b_2o_2o_c)^2}} = \pm \frac{f_2}{\sqrt{f_2^2 + |b_2o_2|^2}} \quad (2-15)$$

另一方面，由于 $oa_1 = ob_1 = oc_1 = r$ 以及正弦定理可得：

$$\sin(\angle oa_1o_c) = \frac{\sin(\angle a_2o_2o_c) \cdot d_2}{|oa_1|} = \frac{d_2}{r} \cdot \sin(\angle a_2o_2o_c) \quad (2-16)$$

$$\sin(\angle ob_1o_c) = \frac{\sin(\angle b_2o_2o_c) \cdot d_2}{|ob_1|} = \frac{d_2}{r} \cdot \sin(\angle b_2o_2o_c) \quad (2-17)$$

结合三角形的内角关系和式(2-12)至式(2-17)可得：

$$\begin{aligned} \sin(\beta_4) &= \sin(180^\circ - \angle oa_1o_c - \angle a_2o_2o_c) \\ &= \frac{|a_2o_2|}{\sqrt{f_2^2 + |a_2o_2|^2}} \left(\frac{d_2 \cdot f_2}{r \cdot |a_2o_2|^2} + \sqrt{1 - \frac{d_2^2 \cdot a_2o_2^2}{r^2(f_2^2 + |a_2o_2|^2)}} \right) \end{aligned} \quad (2-18)$$

$$\begin{aligned} \sin(\beta_3) &= \sin(180^\circ - \angle ob_1o_c - \angle b_2o_2o_c) \\ &= \frac{|b_2o_2|}{\sqrt{f_2^2 + |b_2o_2|^2}} \left(\frac{d_2 \cdot f_2}{r \cdot |b_2o_2|^2} + \sqrt{1 - \frac{d_2^2 \cdot |b_2o_2|^2}{r^2(f_2^2 + |b_2o_2|^2)}} \right) \end{aligned} \quad (2-19)$$

在图 2-6(b)投影仪投影编码图案的示意图中,由摄像机、摄像机和被测物体之间的位置关系可得:

$$\sin(\beta_1) = \sin(\theta - \beta_4) \quad (2-20)$$

$$\sin(\beta_2) = \sin(\theta - \beta_3) \quad (2-21)$$

在三角形 $\square oo_p a_1$ 和三角形 $\square oo_p b_1$ 中,由余弦定理和正弦定理可得:

$$|o_p a_1|^2 = d_1^2 + r^2 - 2 \cdot d_1 \cdot r \cdot \cos(\beta_1) \quad (2-22)$$

$$|o_p b_1|^2 = d_1^2 + r^2 - 2 \cdot d_1 \cdot r \cdot \cos(\beta_2) \quad (2-23)$$

$$\sin(\angle oo_p a_1) = \frac{\sin(\beta_1)}{|o_p a_1|} \cdot r \quad (2-24)$$

$$\sin(\angle oo_p b_1) = \frac{\sin(\beta_2)}{|o_p b_1|} \cdot r \quad (2-25)$$

最后结合式(2-22)至式(2-25)可得到投影图案上条纹间距 ab 的长度,如式(2-26)所示:

$$|ab| = |o_p b| - |o_p a| = (\tan(\angle oo_p b_1) - \tan(\angle oo_p a_1)) \cdot f_1 \quad (2-26)$$

由式(2-10)至式(2-26)推导的投影模型,即可建立起摄像机捕获的结构光图像条纹间距和投影仪投影图案上条纹间距之间的关系。如图 2-6(a)所示,在投影仪、摄像机和被测物体相对位置不变的条件下,摄像机捕获到的条纹间距将和投影点法向量与摄像机主光轴之间的夹角 β_1 、 β_2 有关。当 β_2 增大, β_1 减小时,摄像机捕获到的条纹间距增大;当 β_2 减小, β_1 增大时,摄像机捕获到的条纹间距减小。若将等间距的彩色条纹结构光图案投影到曲面物体时,由于曲面物体表面不同投影点的法向量与摄像机主光轴不一致,从而摄像机捕获的结构光图像会出现条纹间距不一致的现象。将如图 2-7 左侧所示的等间距的 Monks 彩色结构光编码图案投影到球体表面时,相机捕获的结构光图像如图 2-7 右侧的图像所示,其左侧部分条纹过于密集,而右侧部分条纹过于稀疏。因此,以密集区域的条纹为例,要想反馈调节投影图案上对应条纹的间距,使再次捕获的结构光图像条纹间距符合设定的阈值,首先需要检测捕获图像上条纹的边界坐标,如图 2-6(c)所示的 a_2 和 b_2 点,将 $a_2 b_2$ 的间距与设定的阈值比较确定下一次捕获的结构光图像上该条纹的右边界坐标 c_2 ,确定 $a_2 c_2$ 的间距后根据式(2-26)即可计算出编码图案上对应条纹的间距 ac , ac 的长度即为该条纹的反馈调节信息。对捕获结构光图像的每个条纹都进行上述计算,得到每个条纹的反馈调节信息,根据反馈调节信息不断迭代调整投影图案的条纹间距,从而生成自适应结构光空间编码图案。

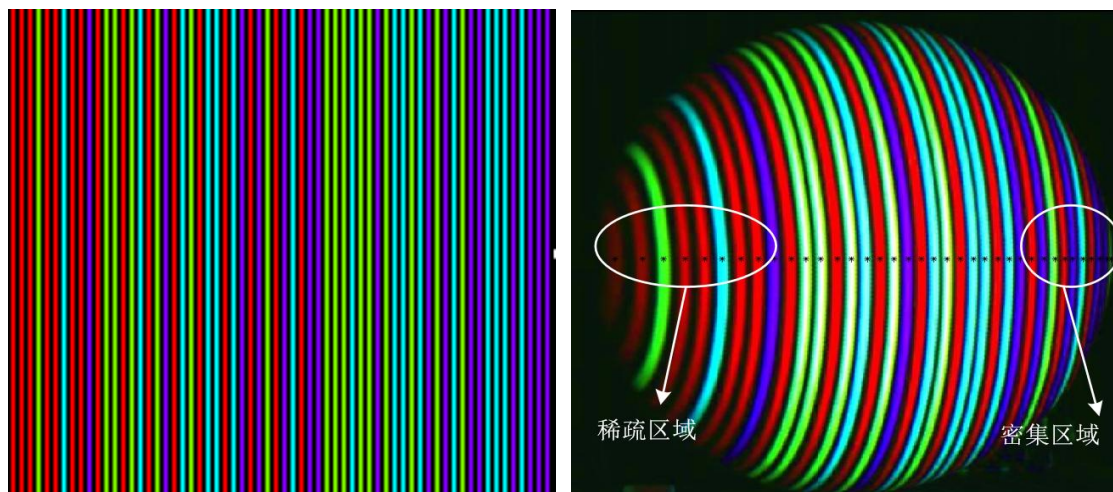


图 2-7 Monks 编码图案和摄像机捕获的结构光图像

Figure 2-7 Monks coding pattern and a structured light image captured by a camera

自适应编码算法以相机捕获的图像、被测物体几何信息以及摄像机、投影仪和被测物体之间的位置参数作为输入，以本章提出的条纹密集度特征和基于几何特征的投影模型为关键理论，通过不断迭代反馈调整条纹间距来生成自适应编码模式图案。算法总体流程归纳如下：

算法 1：基于几何特征的自适应结构光空间编码算法

输入：摄像机捕获的结构光图像和系统标定参数。

输出：不等间距的自适应结构光空间编码图案。

- (1) 利用标定系统计算出摄像机、投影仪和被测物体之间的位置参数以及被测物体的几何参数。
 - (2) 提取摄像机捕获的结构光图像显著性区域，并检测显著性区域中心位置条纹的中心坐标和边界坐标，如图 2-7 右侧图像所示。
 - (3) 利用本文提出的条纹密集度特征计算方法，计算结构光图像的条纹密集度特征分布情况，并与设定的阈值比较，判断是否需要反馈调节条纹间距。
 - (4) 若步骤(3)判断不需要反馈调节条纹间距，则算法结束；如需要反馈调节条纹间距，则根据步骤(1)的相关参数和步骤(2)的条纹边界坐标，通过本文提出的几何特征投影模型计算每个条纹的反馈信息，反馈调节编码图案的条纹间距。
 - (5) 将步骤(4)反馈调节生成的编码图案再次投影到物体表面，摄像机再次同步捕获结构光图像，转至步骤(2)循环迭代计算，直至步骤(3)判断条纹的密集度特征符合设定的阈值，算法结束，输出自适应结构光空间编码图案。
-

2.3 实验结果与分析

本章以球状物体作为实验对象，分别以等间距的 Monks 编码图案^[42]和本文提出的自适应结构光空间编码图案对球体进行表面三维重构，然后通过对比摄像机捕获结构光图像的条纹密集度特征、特征点比重率、特征点匹配精度验证本文算法的有效性。

2.3.1 实验环境

本章的实验设备如图 2-8 所示，投影仪、相机和测量目标物体的位置成三角关系，且保持相对位置不变。本节算法的目的是根据摄像机捕获的结构光图像，通过自适应结构光空间编码算法，设计一种自适应结构光空间编码图案，提高目标物体表面三维重构的精度。

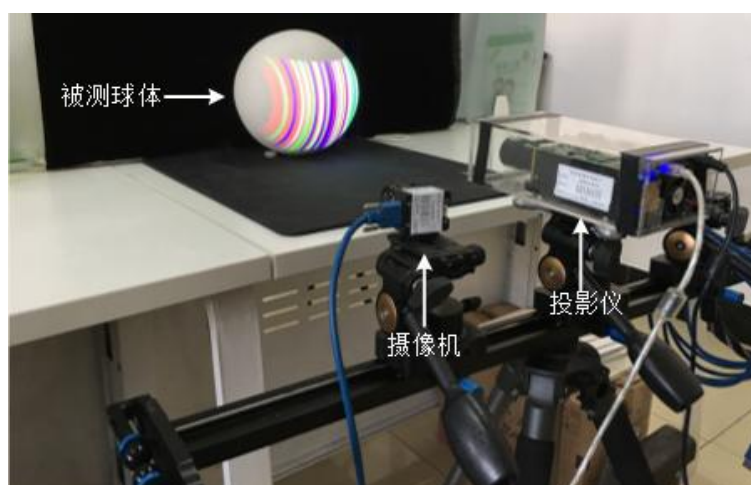


图 2-8 实验设备

Figure 2-8 Experimental equipment

2.3.2 结果对比与分析

为验证本节算法的有效性，首先基于 DeBruijn 序列和预设定的条纹颜色，生成如图 2-7 左侧所示的等间距 Monks 初始编码图案，并将其投影到球体表面上，摄像机同步捕获结构光图像，记为 R_{monks} ，然后根据本章提出的条纹密集度特征计算方法和基于几何特征的投影模型，计算 R_{monks} 显著区域中心位置每个条纹的反馈信息，通过反馈信息不断迭代调整编码图案的条纹间距，生成 Adaptive 自适应结构编码图案，接着再将 Adaptive 编码图案重新投影到球体表面，摄像机再次

同步捕获结构光图像，记为 $R_{adaptive}$ ，最后基于 R_{monks} 和 $R_{adaptive}$ 分别计算并比较 Monks 和 Adaptive 两种编码图案的特征点匹配精度、特征点比重率和三维重构的精度，验证本章的自适应结构光空间编码算法的有效性。特征点匹配精度和特征点比重率定义如下：

$$\text{特征点匹配精度} = \frac{\text{正确匹配特征点数}}{\text{总特征点数}}$$

$$\text{特征点比重率} = \frac{\text{总特征点数}}{\text{结构光覆盖区域总像素个数}}$$

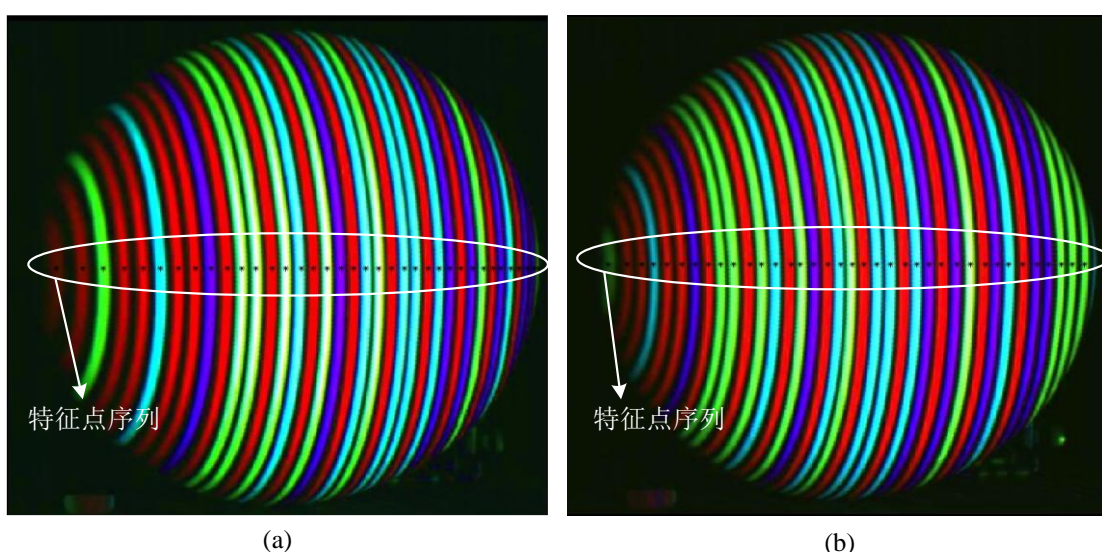


图 2-9 摄像机捕获的结构光图像 (a) R_{monks} 图像 (b) $R_{adaptive}$ 图像

Figure 2-9 Camera capture structured light image (a) R_{monks} image (b) $R_{adaptive}$ image

根据本章提出的自适应结构光编码图案设计算法，首先将如图 2-7 左侧所示的 Monks 初始编码图案投影到球体表面上，摄像机同步捕获的 R_{monks} 结构光图像如图 2-9(a)所示，图中标出的点序列为显著区域中心位置的条纹中心点坐标序列，然后对此序列从左到右，以 $k=5$ 为邻域大小，依次计算每个特征点的密集度特征，其密集度特征的分布曲线如图 2-11 所示。实验中预设的密集度特征的阈值区间为 $[1.6, 1.8]$ ，当 $F(i) < 1.6$ 时，该特征点所属条纹属于密集区域，需要根据投影模型计算密集区域中每个条纹的反馈信息，将条纹间距变大；当 $F(i) > 1.8$ 时，该特征点所属条纹属于稀疏区域，也需要根据投影模型计算稀疏区域中每个条纹的反馈信息，将条纹间距变小。通过不断迭代反馈调节编码图案的条纹间距，将生成的自适应空间编码图案重新投影到球体表面，摄像机再次同步捕获结构光图像，并计算条纹密集度特征直到符合设定的阈值，生成的 Adaptive 自适应结构光编码模式图案

如图 2-10 所示, 最后捕获的 $R_{adaptive}$ 图像如图 2-9(b)所示, 其密集度特征分布曲线如图 2-11 所示。



图 2-10 Adaptive 自适应结构光编码模式

Figure 2-10 Adaptive structured light coding mode

从图 2-11 的密集度特征分布曲线可以看出, $R_{adaptive}$ 的条纹密集度特征分布比较稳定, 基本分布在设定阈值的范围之内, 而 R_{monks} 的条纹密集度特征分布曲线差异较大, 分布不均, 验证了本文提出的 Adaptive 编码图案投影到球体表面不会再出现条纹稀疏和密集的现象。

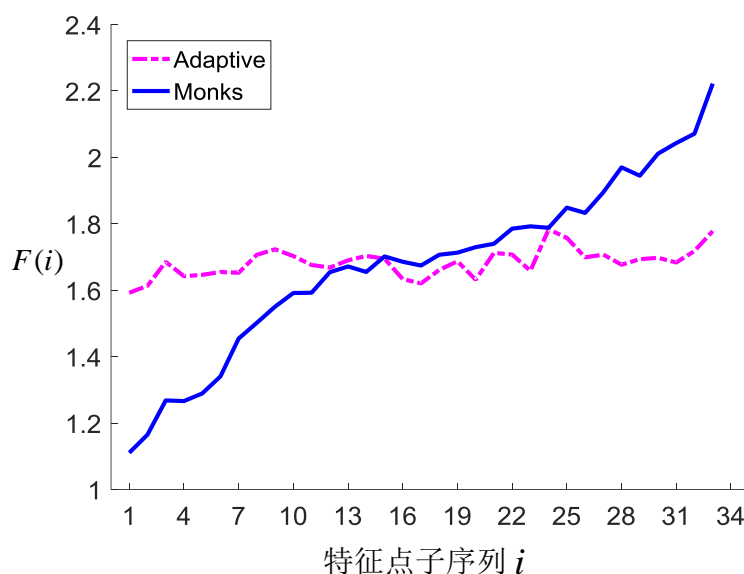


图 2-11 密集度特征分布曲线

Figure 2-11 Density characteristic distribution curve

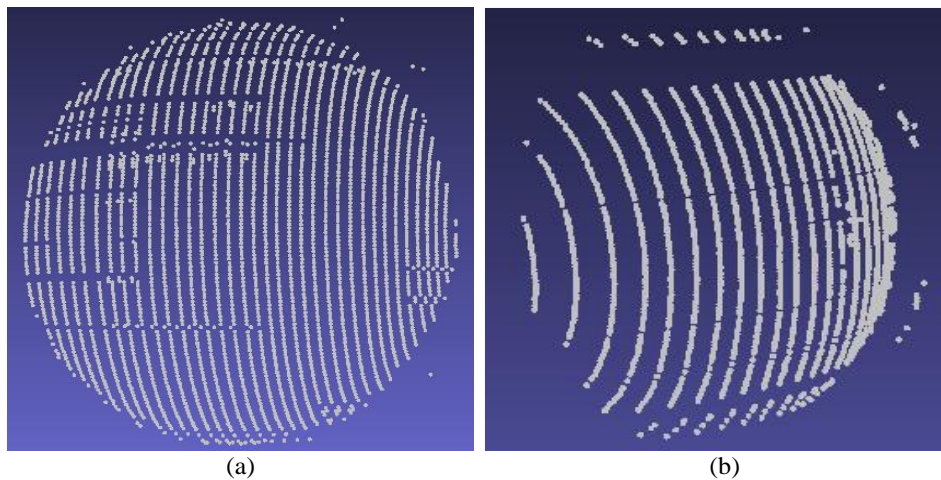
此外, 在 Monks 和 Adaptive 两种不同模式的投影下, 通过计算并对比 R_{monks} 和 $R_{adaptive}$ 的特征点匹配精度、特征点比重率和三维重构精度, 验证 Adaptive 自适应结构光空间编码算法的有效性。表 2-1 是 R_{monks} 和 $R_{adaptive}$ 的特征点匹配精度、特征点比重率和三维重构精度的对比结果。由于摄像机、投影仪和被测物体之间的相对位置保持不变, 因此, R_{monks} 和 $R_{adaptive}$ 的显著性区域像素点个数相同。由表 2-1 的实验结果可以看出, 本文提出的 Adaptive 空间编码图案由于条纹密集度特征

分布比较均匀,在显著性区域像素点个数相同的情况下,特征点数量达到了 45325 个,与 Monks 编码图案相比多出了一万多个特征点,比重率也达到了 0.12。在特征点匹配精度方面,由于 Adaptive 编码图案没有条纹过于密集的局域,因此在整体上特征点的匹配精度也得到了很大的提升,达到了 0.91,说明提出的 Adaptive 自适应编码图案在提高编码图案的空间分辨率的同时,也提高了解码的精度。另外,图 2-12 所示的是两种编码图案投影下的三维点云重构结果,从主观视觉可以看出,Adaptive 编码模式重构的点云数据分布更为均匀,杂乱的数据也比较少,通过以上实验结果,说明本文算法有效的提高了编码图案的空间分辨率和解码的精度。

表 2-1 Monks 和 Adaptive 编码模式实验结果比较

Table 2-1 Comparison of experimental results of Monks and Adaptive coding patterns

编码模式	检测特征点数	显著性区域像素点个数	匹配精度	比重率
R_{monks}	31421	377052	0.85	0.08
$R_{adaptive}$	45325	377052	0.91	0.12

图 2-12 三维重构结果 (a) $R_{adaptive}$ 重构结果 (b) R_{monks} 重构结果Figure 2-11 (a)3D reconstruction results of $R_{adaptive}$ (b)3D reconstruction results of R_{monks}

2.4 本章小结

本文主要针对 DeBruijn 序列彩色结构光编码图案空间分辨率低的问题,提出了基于被测物体表面几何特征的自适应结构光空间编码算法,解决了 DeBruijn 序列初始编码图案投影到球状物体表面时出现条纹稀疏和密集现象,导致特征点匹配精度和空间分辨率低的问题。由实验结果可以看出,自适应结构光编码图案能有效的提高特征点的比重率和编码图案的空间分辨率。

3 基于色彩迁移技术的彩色结构光解码算法

基于空间编码结构光实现高精度三维重构，除了需要提高编码图案的空间分辨率之外，还需要对编码图案投影后摄像机捕获的结构光图像做高精度解码。在解码过程中，结构光图像的条纹中心点颜色识别和中心点坐标准确提取是影响解码精度的关键因素。然而结构光图像的获取容易受到拍摄环境、光照条件、被测物体表面材料特性、表面纹理以及拍摄方式等因素的综合影响，使得相机拍摄到的结构光图像质量严重下降，从而降低了条纹中心点颜色识别和中心点坐标提取的精度，导致解码精度的降低^{[47][48]}。因此，准确的条纹中心点坐标提取和中心点颜色识别是提高系统解码精度的关键，也是提高三维重构精度的前提。

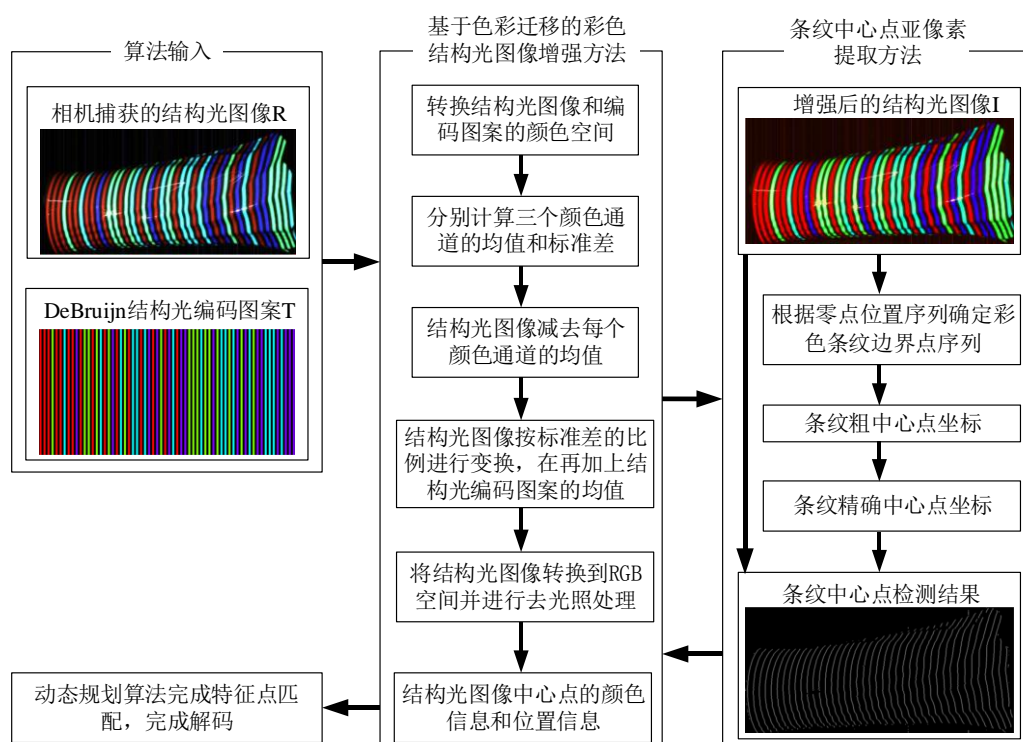


图 3-1 基于色彩迁移技术的彩色结构光解码算法原理图

Figure 3-1 Schematic diagram of color structure light decoding algorithm based on color transfer

在编码结构光三维重构测量技术中，结构光解码是完成结构光编码图案和结构光图像之间特征点的匹配。本章针对光照和物体表面纹理等因素导致解码精度不高的问题，提出了一种基于色彩迁移技术的 DeBruijn 彩色结构光解码算法。算法流程如图 3-1 所示，首先以彩色结构光编码图案的颜色分布信息为先验知识，利

用基于色彩迁移技术的结构光图像增强算法，对输入的结构光图像进行增强处理，达到还原彩色条纹中心点颜色信息的目的，从而完成颜色识别；然后利用基于色彩迁移技术的条纹中心点亚像素提取算法，对增强后的结构光图像进行条纹中心点提取，从而准确获得条纹中心点的位置信息和颜色信息，最后利用动态规划算法完成特征点匹配。

3.1 色彩迁移技术

图像色彩迁移，主要的原理是以一张图像作为目标图像，将目标图像的色彩分布信息迁移到原图像上，对原图像进行色彩变换，使最后的输出图像含有原图像的形状信息，又具有目标图像的色彩信息^{[49][50]}。

实际上，可用数学变换 T 表示色彩迁移的过程，即 $c(x, y) = T(t(x, y), r(x, y))$ ，其中， $c(x, y)$ 是输出的结果图像， $t(x, y)$ 是目标图像， $r(x, y)$ 是原图像。利用 CIELAB 颜色空间中各通道之间相互正交的特性，图像之间的色彩迁移通常在 CIELAB 颜色空间中进行变换。首先，在目标图像和原图像中提取出需要进行色彩变换的显著性区域，并将目标图像和原图像分别转换到 CIELAB 颜色空间，然后在 CIELAB 颜色空间分别计算两个目标区域各颜色通道的标准差和均值，最后将目标图像上显著性区域的标准差和均值变换到原图像的显著性区域上，完成目标图像和原图像之间的色彩迁移。目前，色彩迁移技术在黑白图像彩色化、电影特效制作和褪色文物彩色化等领域得到了广泛的应用^[51]。

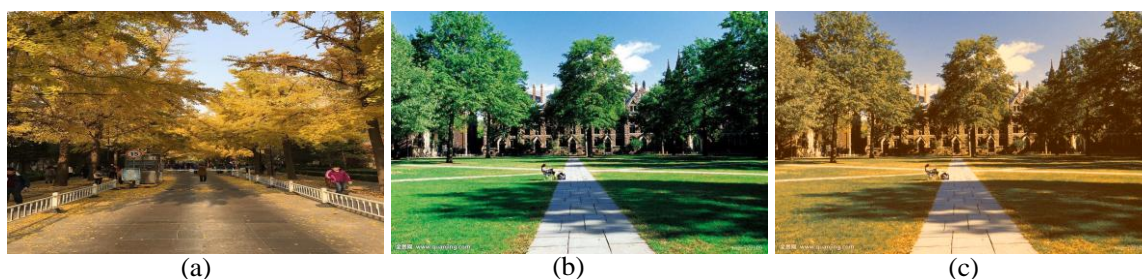


图 3-2 图像色彩迁移处理结果 (a)目标图像 (b)原图像 (c)输出图像

Figure 3-2 Image color transfer processing results (a) Target image (b) Source image (c) Output image

图 3-2 是对生活中拍摄的景物图像进行色彩迁移处理后的结果示意图。图 3-2(a)是目标图像，图 3-2(b)是原图像，色彩迁移的目标就是将图 3-2(a)目标图像的颜色信息，迁移到图 3-2(b)原图像上，使最后输出的图像，如图 3-2(c)所示，具有图 3-2(a)的颜色信息的同时又具有图 3-2(b)的形状信息^[51]。

3.2 彩色结构光解码算法

空间编码结构光，利用的是特征点邻域范围内的其他特征点的颜色信息进行解码，因此需要准确提取特征点的坐标信息和颜色信息，对于本文的 DeBruijn 序列彩色条纹空间编码来说，特征点即是条纹的中心点。由前一章的 DeBruijn 序列彩色结构光空间编码算法可知，编码时采用 4 种颜色，唯一性邻域大小为 3，生成如图 3-3(b)所示的编码图案，所以图 3-3(a)中邻域为 3 的彩色条纹子序列，在整个彩色条纹序列中出现且只出现一次。因此，如图 3-3 所示，解码时首先需要检测出结构光图像条纹的中心点作为特征点，然后基于当前特征点和左右两个特征点的颜色信息，组成一个长度为 3 的颜色序列，与结构光编码图案中的整个条纹颜色信息序列进行匹配查找，从而确定结构光编码图案中与当前特征点相对应的匹配点坐标，完成结构光图像的解码。

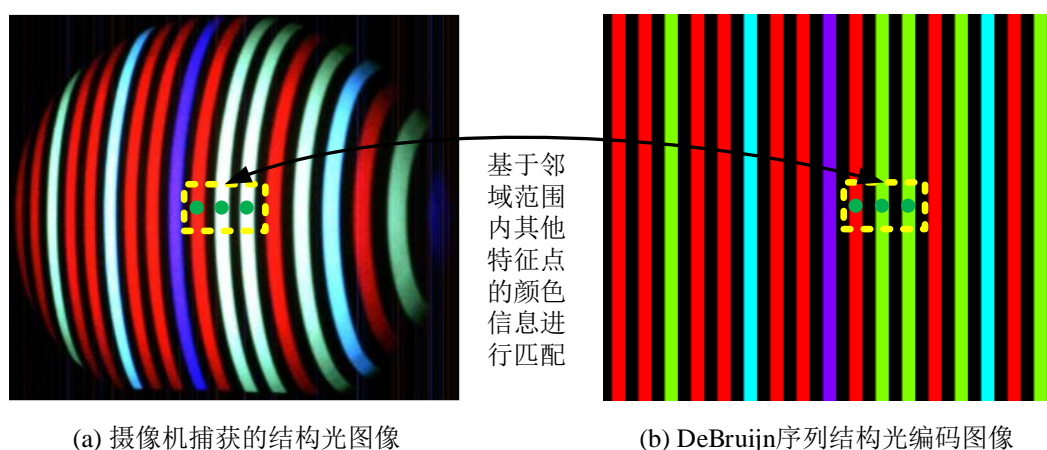


图 3-3 空间编码结构光解码过程

Figure 3-3 Decoding process of space coded structure light

由于摄像机捕获结构光图像的过程中受到环境光照、被测物体表面纹理和其他因素的影响，使得捕获的结构光图像颜色信息丢失严重，降低了解码时颜色识别的精度和特征点提取的精度。如图 3-3(a)所示，其中，绿色条纹受环境光照的影响，使得颜色几乎退化为白色，丢失了原来的颜色信息，导致在编码图案序列中进行匹配查找时无法找到对应的子序列，严重降低了颜色识别和匹配的精度。因此，针对这一问题，本章首先基于色彩迁移技术提出一种彩色结构光图像增强方法，提高结构光图像颜色识别的精度；然后在此基础上，提出一种条纹特征点两步精确定位的方法，进一步提高特征点提取的精度，最终实现高精度的彩色结构光解码。

3.2.1 基于色彩迁移的彩色结构光图像增强方法

在基于色彩迁移的彩色结构光图像增强过程中，将结构光编码图案作为色彩迁移的目标图像，相机捕获的结构光图像作为原图像，以结构光编码图案的颜色分布作为先验知识，将结构光编码图案的颜色分布迁移到结构光图像上，实现结构光图像条纹颜色的退化还原，以消除测量目标材质和环境光照的对颜色识别的影响。结构光图像中的条纹形变特征，是被测物体表面几何特征对投影到其表面的结构光编码图案调制的结果，反映了被测物体表面的三维信息，而条纹的颜色特征是解码阶段进行特征点提取和特征点匹配的重要依据，因此结构光图像的条纹颜色增强处理在还原结构光编码颜色的同时，必须保证条纹形变特征的稳定不变。

在基于色彩迁移的结构光图像增强过程中，需要将结构光编码图案各个颜色通道的颜色分布独立地迁移到摄像机捕获的结构光图像上。通常，工业相机捕获到的结构光图像多为彩色的 RGB 图像，由于 RGB 空间的各通道之间相互影响，因此色彩迁移通常在转换到 $l\alpha\beta$ 颜色空间中进行。在 $l\alpha\beta$ 颜色空间中，各个分量之间是近似正交的关系，当改变其中一个分量时，不会给另外两个分量带来影响^{[52][53]}，因此可以在不同通道之间独立地进行统计信息的迁移。

设 R 和 T 分别表示结构光图像和结构光编码图案，图像的分辨率都为 $U \times V$ ，则结构光图像和结构光编码图案在 l 、 α 和 β 三个通道的均值和标准差如下式所示：

$$m_R^K = \frac{\sum_{i=1}^U \sum_{j=1}^V R(i, j)_K}{U \cdot V} \quad (3-1)$$

$$m_T^K = \frac{\sum_{i=1}^U \sum_{j=1}^V T(i, j)_K}{U \cdot V} \quad (3-2)$$

$$\sigma_R^K = \left(\sum_{i=1}^U \sum_{j=1}^V (R(i, j)_K - m_R^K)^2 \right)^{\frac{1}{2}} \quad (3-3)$$

$$\sigma_T^K = \left(\sum_{i=1}^U \sum_{j=1}^V (T(i, j)_K - m_T^K)^2 \right)^{\frac{1}{2}} \quad (3-4)$$

其中 $K \in \{l, \alpha, \beta\}$ ， m_R^l 、 m_R^α 和 m_R^β 表示结构光图像各个颜色通道的均值， m_T^l 、 m_T^α 和 m_T^β 表示结构光编码图案各个颜色通道的均值， σ_R^l 、 σ_R^α 和 σ_R^β 表示结构光图像各个颜色通道的标准差， σ_T^l 、 σ_T^α 和 σ_T^β 表示结构光编码图案各个颜色通道的标准差， $R(i, j)_K$ 和 $T(i, j)_K$ 分别表示图像 R 和 T 在像素点 (i, j) 的 K 通道像素值。

颜色通道的均值和标准差描述了结构光图像和结构光编码图案的颜色分布，为此我们提出了基于结构光编码图案各颜色通道均值和方差的结构光图像色彩迁移变换模型，模型如式(3-5)至(3-7)所示：

$$R^*(i, j)_l = \frac{\sigma_T^l}{\sigma_R^l} \cdot R'(i, j)_l + m_T^l \quad (3-5)$$

$$R^*(i, j)_\alpha = \frac{\sigma_T^\alpha}{\sigma_R^\alpha} \cdot R'(i, j)_\alpha + m_T^\alpha \quad (3-6)$$

$$R^*(i, j)_\beta = \frac{\sigma_T^\beta}{\sigma_R^\beta} \cdot R'(i, j)_\beta + m_T^\beta \quad (3-7)$$

其中 $R^*(i, j)_K$ 表示色彩迁移变换后图像 R 在像素点 (i, j) 的 K 通道像素值， $R'(i, j)_K$ 表示图像 R 在 K 通道均值上的变化， $K \in \{l, \alpha, \beta\}$ ，计算(3-8)至(3-10)所示：

$$R'(i, j)_l = R(i, j)_l - m_R^l \quad (3-8)$$

$$R'(i, j)_\alpha = R(i, j)_\alpha - m_R^\alpha \quad (3-9)$$

$$R'(i, j)_\beta = R(i, j)_\beta - m_R^\beta \quad (3-10)$$

另外，结构光图像捕获过程中通常还受到环境光照的影响，也会给颜色的识别带来很大的影响。因此，针对本文的结构光编码图案，提出相适应的去光照模型。首先，由结构光编码图案的颜色分布可知，在 RGB 颜色空间中，结构光编码图案中每个像素点的三通道像素最小值为 0，但由于光照对结构光图像的影响，导致其像素的最小值通常不为 0。因此，本文的光照模型中，将图像 R^* 中每个像素点的各个颜色通道最小值定义为光照模型 λ ， R^* 是色彩迁移处理后的图像，去光照处理后的结构光图像定义为 I ，则光照计算模型如式(3-11)和(3-12)所示：

$$\lambda(i, j) = \text{Min}(R^*(i, j)_X) \quad (3-11)$$

$$I(i, j)_X = R^*(i, j)_X - \lambda(i, j) \quad (3-12)$$

其中， $R^*(i, j)_X$ 和 $I(i, j)_X$ 分别表示图像 R^* 和 I 在像素点 (i, j) 的 X 通道像素值， $\lambda(i, j)$ 表示图像 R^* 在像素点 (i, j) 的光照， $X \in \{R, G, B\}$ 。

3.2.2 彩色条纹中心点亚像素提取方法

色彩迁移技术的彩色结构光图像增强方法能够消除物体表面纹理、环境光照和相机畸变等因素对结构光图像的干扰，使结构光图像具有与结构光编码图案相似的颜色分布。在基于色彩迁移技术的彩色结构光图像增强算法基础上，本章还提出一种条纹中心点亚像素两步定位法，实现中心点的亚像素提取。首先在 RGB 颜色空间，对结构光图像每一行的像素最大值序列求一阶差分导数和二阶差分导数，根据二阶导数确定条纹边界点序列，再根据一阶导数实现条纹中心点的粗定位；然后基于 Hession 矩阵确定粗条纹中心点的法线方向，并在法线方向上利用泰勒公式

展开实现条纹中心的精确定位，从而实现条纹中心的高精度提取。

色彩迁移处理和去光照后的结构光图像为 I ，图像的分辨率为 $U \times V$ ，如图 3-4 所示，实线框内的圆点序列为其中一行的条纹中心点位置。DeBruijn 结构光解码方向是垂直于条纹的方向，因此在解码过程中进行中心坐标提取时，遍历图像 I 的每一行依次确定条纹中心坐标。假设结构光图像 I 像素点 (i, j) 的三通道像素最大值归一化后为 $M_i(j)$ ，即：

$$M_i(j) = \text{Max}(I(i, j)_K) \quad (3-13)$$

其中 $K \in \{R, G, B\}$ ， $i = 1 \cdots U$ ，表示第 i 行， $j = 1 \cdots V$ ，表示第 j 列。以图 3-4 左侧的彩色花瓶结构光图像为例，其中第 i 行的 M_i 分布曲线如图 3-4 右侧的图像所示。从 M_i 的分布曲线可以看出，由于彩色条纹受两边黑色背景的影响，颜色从黑色渐变到最亮的彩色后又渐变到黑色，因此 M_i 的曲线分布符合高斯分布。理想情况下，条纹的中心点为 M_i 分布曲线的极大值点，对于离散函数 M_i 曲线，可通过有限差值的方法，近似求解二阶导数来确定极大点，从而确定彩色条纹的中心点坐标。但在捕获结构光图像时由于外界因素对 M_i 分布曲线的影响，在一个彩色条纹区间内会出现多个局部极大值点。因此直接通过二阶导数确定的极大值点不能得到真实的条纹中心点坐标。鉴于此，本文的中心点提取方法首先根据 M_i 的二阶导数确定条纹间的边界点，再根据 M_i 的一阶导数确定两个边界点之间的条纹粗中心点坐标，然后基于粗中心点的法线方向，通过泰勒公式展开进行中心点精确定位，从而实现条纹中心点的高精度提取。

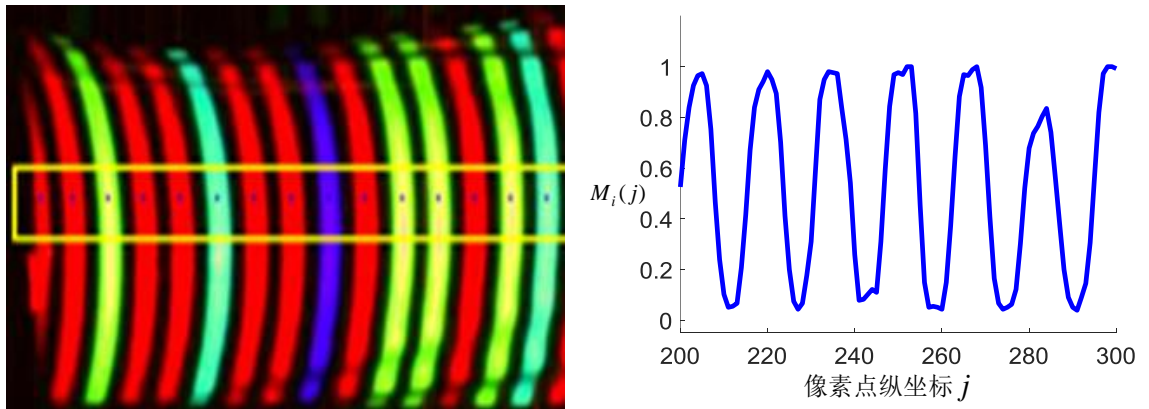


图 3-4 结构光图像彩色条纹中心点坐标位置及其 M_i 分布曲线

Figure 3-4 Structure light image stripe sub-pixel center position and distribution curve of M_i

在检测第 i 行条纹之间的边界点时，首先根据第 i 行的 M_i 二阶导数，循环判断这一行每一个像素点 (i, j) 是否为零点位置，并定义零点亚像素位置为 $(i, j + \Delta j)$ ，得到零点亚像素位置序列， Δj 的计算如式(3-14)所示。

$$\Delta j = \frac{dS_i(j-1)}{dS_i(j-1) - dS_i(j)} - 1 \quad (3-14)$$

$$dM_i(j) = \frac{M_i(j+1) - M_i(j-1)}{2} \quad (3-15)$$

$$S_i(j) = dM_i(j) \times dM_i(j) \quad (3-16)$$

$$dS_i(j) = \frac{S_i(j+1) - S_i(j-1)}{2} \quad (3-17)$$

式中 $dM_i(j)$ 为 $M_i(j)$ 的一阶导数, $S_i(j)$ 为 $dM_i(j)$ 的平方值, $dS_i(j)$ 为 $S_i(j)$ 的一阶导数, $j=2 \cdots V$ 。如果当前像素点 (i, j) 的 $dS_i(j)$ 值为零, 则 (i, j) 即为零点位置, $\Delta j=0$; 如果当前像素点 (i, j) 的 $dS_i(j)$ 和前一个像素点 $(i, j-1)$ 的 $dS_i(j-1)$ 值都不为零, 而且符号相反, 则零点位置介于 $j-1$ 和 j 之间, 其零点亚像素为 $(i, j-1+\Delta j)$, 从而得到结构光图像上第 i 行的零点位置序列。

然后, 根据零点位置序列确定条纹边界点位置序列。如果当前零点位置 j 的一阶导数值 $dS_i(j)$ 大于零, 而且下一个零点位置 $j+1$ 的一阶导数值 $dS_i(j+1)$ 小于零, 则当前零点位置 j 为条纹边界点位置, 反之则不是边界点, 通过遍历判断第 i 行 dS_i 的值, 得到结构光图像上第 i 行的条纹边界位置序列。

最后, 根据条纹边界点位置序列确定粗中心坐标。假定当前边界点为 q , 其像素坐标为 $(i, f(q))$, 下一个边界点为 $q+1$, 其像素坐标为 $(i, f(q+1))$, $f(q)$ 表示的是当前行第 q 个边界点的纵坐标, 则定义 q 与 $q+1$ 之间条纹粗中心点坐标如下:

$$c = f(q) + \frac{T \cdot I^{-T}}{n} - 0.5 \quad (3-18)$$

在解码过程中只需要确定彩色条纹的中心位置, 因此在确定中心位置之前要确定 q 与 $q+1$ 之间是黑色条纹还是彩色条纹。假设 q 与 $q+1$ 之间的像素点个数为 n , 令这 n 个像素点的 M_i 向量为 T , 即 $T(k) = M_i(j)$, $k=1, \dots, n$, $j=f(q), \dots, f(q+1)$, 分别统计向量 T 的递增点个数和递减点个数, 即当 $T(k) > T(k+1)$, 则递减点个数加 1, 如果 $T(k) < T(k+1)$, 则递增点个数加 1。因为黑色背景是从彩色渐变到黑色, 所以递减点个数小于递增点个数, 而彩色条纹是从黑色渐变到彩色, 所以递减点个数会大于递增点个数。因此, 可统计向量 T 的递增点和递减点的个数, 来判别条纹是黑色背景条纹还是彩色条纹, 若是彩色条纹, 则根据式(3-18)确定粗中心点坐标。式(3-18)中, I 为 T 的索引向量, 即 $I(s) = s$, $s=1, \dots, n$ 。

得到条纹粗中心点位置序列之后, 再基于每个粗中心点的法线方向, 根据泰勒公式展开得到精确中心点坐标。假设当前的粗中心点的坐标为 (x, y) , 粗中心点的法线方向可通过 Hession 矩阵的特征值和特征向量来确定^{[54][55]}, Hession 矩阵如式(3-19)所示:

$$H(x, y) = \begin{pmatrix} \frac{\partial g(x, y)}{\partial x^2} & \frac{\partial g(x, y)}{\partial x \partial y} \\ \frac{\partial g(x, y)}{\partial x \partial y} & \frac{\partial g(x, y)}{\partial y^2} \end{pmatrix} \otimes I(x, y) = \begin{pmatrix} r_{xx} & r_{xy} \\ r_{xy} & r_{yy} \end{pmatrix} \quad (3-19)$$

式中 $g(x, y)$ 是二维高斯函数, 假设点 (x, y) 的法线向量的单位向量为 $n = (n_x, n_y)$, 以粗中心点坐标 (x, y) 为基点, 对该基点的像素分布函数沿 (n_x, n_y) 方向进行二阶泰勒公式展开, 则精确中心点的像素值可以表示为:

$$I(x + tn_x, y + tn_y) = I(x, y) + tn \cdot (r_x, r_y)^T + \frac{t^2}{2!} \cdot n^T \cdot H(x, y) \cdot n \quad (3-20)$$

其中 (r_x, r_y) 由图像 $I(x, y)$ 与高斯卷积核得到, 即如式 (3-21) 和式 (3-22) 所示:

$$r_x = \left(\frac{\partial g(x, y)}{\partial x} \right) \otimes I(x, y) \quad (3-21)$$

$$r_y = \left(\frac{\partial g(x, y)}{\partial y} \right) \otimes I(x, y) \quad (3-22)$$

由 $\frac{\partial I}{\partial t} = 0$, 再根据式 (3-20) 得到:

$$t = \frac{n_x r_x + n_y r_y}{n_x^2 \cdot r_{xx} + 2n_x n_y r_{xy} + n_y^2 r_{yy}} \quad (3-23)$$

则条纹精确中心点坐标为 $(x + tn_x, y + tn_y)$ 。根据以上原理, 基于色彩迁移技术的条纹中心点亚像素提取算法如算法 2 所示。

算法 2 : 基于色彩迁移技术的条纹中心点亚像素提取算法

输入: 相机捕获的结构光图像。

输出: 结构光图像的彩色条纹中心点亚像素坐标。

- (1) 根据式 (3-13) 获取第 i 行所有坐标点的 RGB 三通道最大值序列 M_i 。
 - (2) 根据式 (3-15) 计算 M_i 的一阶导数 dM_i , 根据式 (3-17) 计算 S_i 的一阶导数 dS_i 。
 - (3) 根据式 (3-14) 确定第 i 行 dS_i 的亚像素零点位置序列, 再根据零点位置序列确定第 i 行条纹边界点位置序列。
 - (4) 判断两个边界点之间是彩色条纹还是黑色背景条纹, 若是彩色条纹, 则根据式 (3-18) 确定这两个条纹边界点之间的粗中心位置坐标。
 - (5) 根据式 (3-19) 计算粗中心点坐标的法线方向, 然后基于式 (3-20) 对粗中心点坐标进行泰勒公式展开, 最后根据式 (3-23) 得到条纹的精确中心点坐标。
 - (6) 结构光图像的每一行重复步骤 (1) 至步骤 (5), 得到每一行的条纹中心点坐标, 完成整张结构光图像的条纹中心点提取。
-

3.3 实验结果与分析

本章在多组结构光图像上设置了对比实验，通过对比本文算法和其他算法的实验结果，验证了本文提出的算法具有更高的准确性和有效性。

3.3.1 实验环境

本章的实验设备是 TI 的 DLP4500 数字投影仪和 POINTGREY 的 CM3-U3-13Y3C-CS 工业相机，其分辨率分别为 912×1140 和 1280×1024 。为了验证算法的有效性，本文结合峰值信噪 PSNR、均方误差 MSE、Lab 颜色空间亮度分布对比以及特征点匹配精度，评价本文的结构光图像增强方法和条纹中心点提取方法的有效性。其中 MSE 能够反映结构光图像颜色增强后与结构光编码图像之间的误差，其值越小，说明结构光图像增强效果越好；而 PSNR 的值越大，说明结构光图像增强效果越好^[56]。

3.3.2 结果对比与分析

本章分别以钢轨金属材质、彩色花瓶材质、人手部和雕像为被测目标进行实验，这几种被测目标表面的材质和形状各具代表性，能充分验证本文结构光图像增强算法对不同物体的结构光图像增强效果的鲁棒性，以及条纹中心点亚像素提取算法对表面形状变化剧烈的结构光图像中心点提取结果的适用性。受物体表面材质纹理和不均匀光照等因素的影响，将 DeBruijn 结构光编码图案投影到各种材质物体表面时都发生了色彩扭曲，每种彩色条纹都发生了不同程度的色彩变化，加大了颜色识别的难度。图 3-5 所示为本文增强算法和 Retinex 算法^[57]对结构光图像增强后的结果，其中具有金属光泽的轮轨金属表面、浅绿色的花瓶材质和人手皮肤颜色的结构光图像能充分验证本文算法的鲁棒性。从视觉效果的对比结果可以看出，本文的增强算法明显改善了结构光图像的质量。

除了主观视觉效果的对比之外，本文还分别计算了两种算法处理之后的峰值信噪比和均方误差进行验证。从表 3-1 中的 MSE 和 PSNR 的对比结果可以看出，本文的处理结果不管是峰值信噪比还是均方误差，都要好于 Retinex 方法的结果，说明了本文增强算法处理结构光图像的有效性。此外，基于本章的条纹中心点提取算法和动态规划算法进行了特征点的匹配，最后通过比较两种算法的匹配精度来验证本章结构光解码算法的精度。

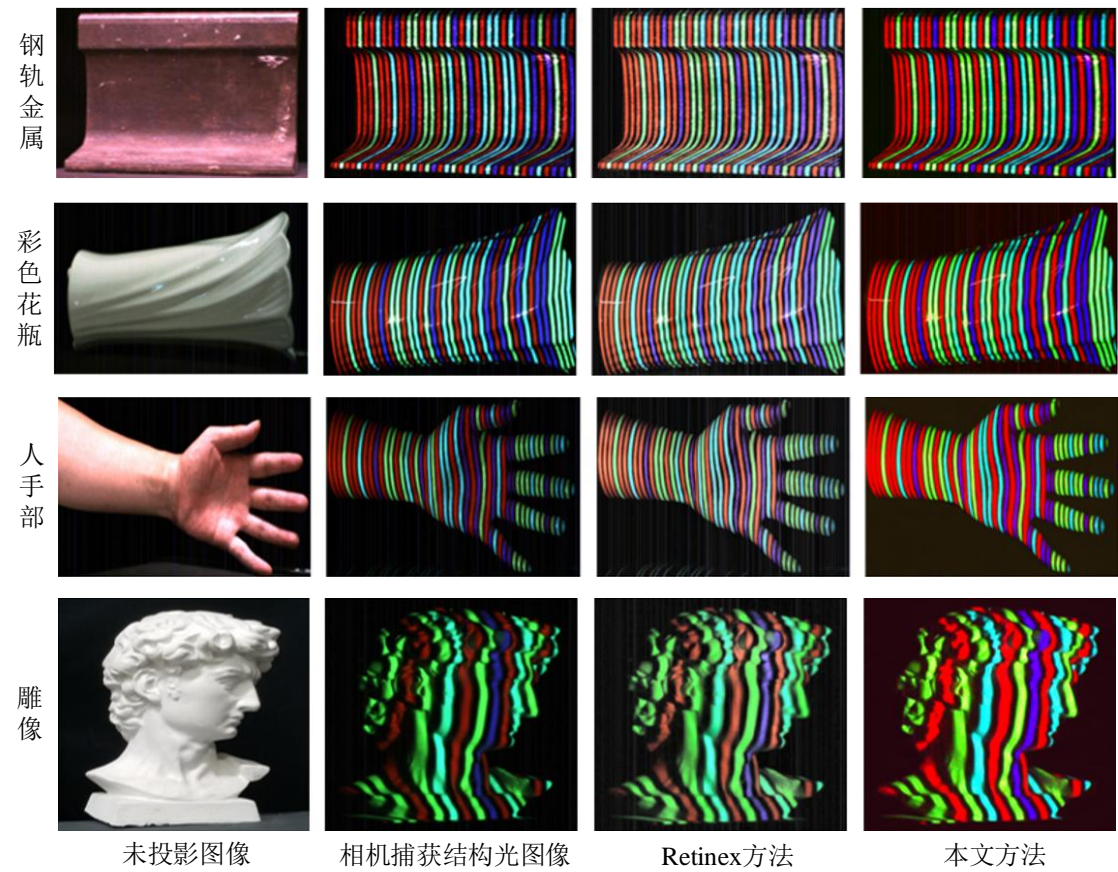


图 3-5 相机捕获的结构光图像和增强处理后的结果对比

Figure3-5 Comparison of the results of a structured light image captured by a camera and an enhanced processing

表 3-1 结构光图像增强处理结果对比

Table 3-1 Contrast of structural light image enhancement

增强算法	实验目标物体	MSE	PSNR	匹配精度
Retinex 算法	钢轨金属	109.1	27.7565	89.1%
本文算法	钢轨金属	101.4	28.0718	95.3%
Retinex 算法	彩色花瓶	107.4	27.8214	92.6%
本文算法	彩色花瓶	99.3	28.1628	96.1%
Retinex 算法	人手部	121.9	27.2709	90.3%
本文算法	人手部	70.5	29.6479	96.2%
Retinex 算法	雕像	129.6403	27.0034	88.9%
本文算法	雕像	101.0504	28.0854	94.3%

此外，为了进一步验证本文算法的增强效果，本文还将两种算法处理后的图

像转换到了 Lab 颜色空间，通过与结构光编码图案（Ground Truth）的 L 通道进行对比进行验证。在 Lab 颜色空间中，各颜色分量之间是相对独立，其中 L 分量用于表示像素的亮度， a 表示从红色到绿色的范围， b 表示从黄色到蓝色的范围。实验分别取两组处理后的图像，并检测其中一行的 L 分量进行比较，分布曲线如图 3-7 所示。

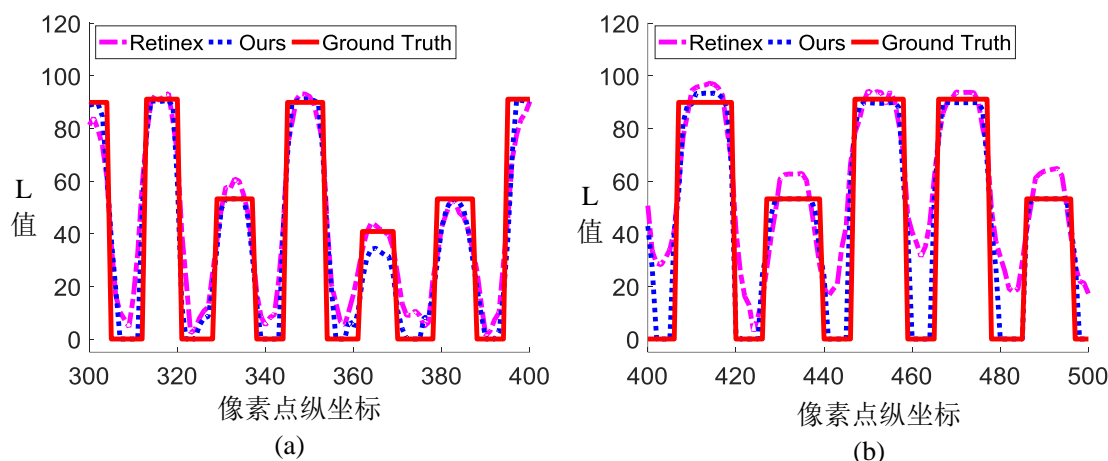


图 3-6 (a)钢轨金属结构光图像 L 值分布曲线 (b)彩色花瓶结构光图像 L 值分布曲线

Figure 3-6 (a)L value distribution curve of rail metal structured light image (b) L value distribution curve of coloured vase structured light image

图 3-6 中的红色实线是结构光编码图案(Ground Truth)的 L 值分布，蓝色虚线为本文算法处理后结构光图像的 L 值分布，粉红色虚实线表示的是 Retinex 算法处理后结构光图像的 L 值分布。从图 3-6(a)的钢轨金属结构光图像 L 值曲线和图 3-6(b)彩色花瓶结构光图像的 L 值曲线可以得出，本章算法处理后结构光图像的 L 值分布更接近于 Ground Truth 的 L 值分布，由此可以验证本文提出的色彩迁移彩色结构光图像增强算法能够显著提高结构光图像颜色识别的精度。

在彩色结构光图像特征点提取方面，基于本章提出的彩色结构光图像增强算法，提出了两步精确定位的条纹中心点亚提取算法。首先，将本章的提取算法和 Rongqian Yang 算法^[48]分别对图 3-5 中的结构光图像进行条纹中心点提取，两种算法对钢轨金属、彩色花瓶、人手部和雕像的结构光图像中心点提取结果如图 3-7 所示。从主观视觉对比可以看出，Rongqian Yang 算法会出现部分漏检和错检的情况，漏检和错检的主要原因是多条纹彩色图像在灰度化过程中容易出现灰度化非对称的现象，而本文的中心点提取算法首先在 RGB 空间完成条纹中心点的粗定位，然后再基于粗中心点的法线方向进行泰勒公式展开实现精确定位，避免了图

像灰度化的过程，实现了高精度的条纹中心点提取。对于目标表面形状变化比较剧烈的雕像结构光图像，本文的中心点提取算法仍能保持较好的提取效果，验证了本文算法的鲁棒性。

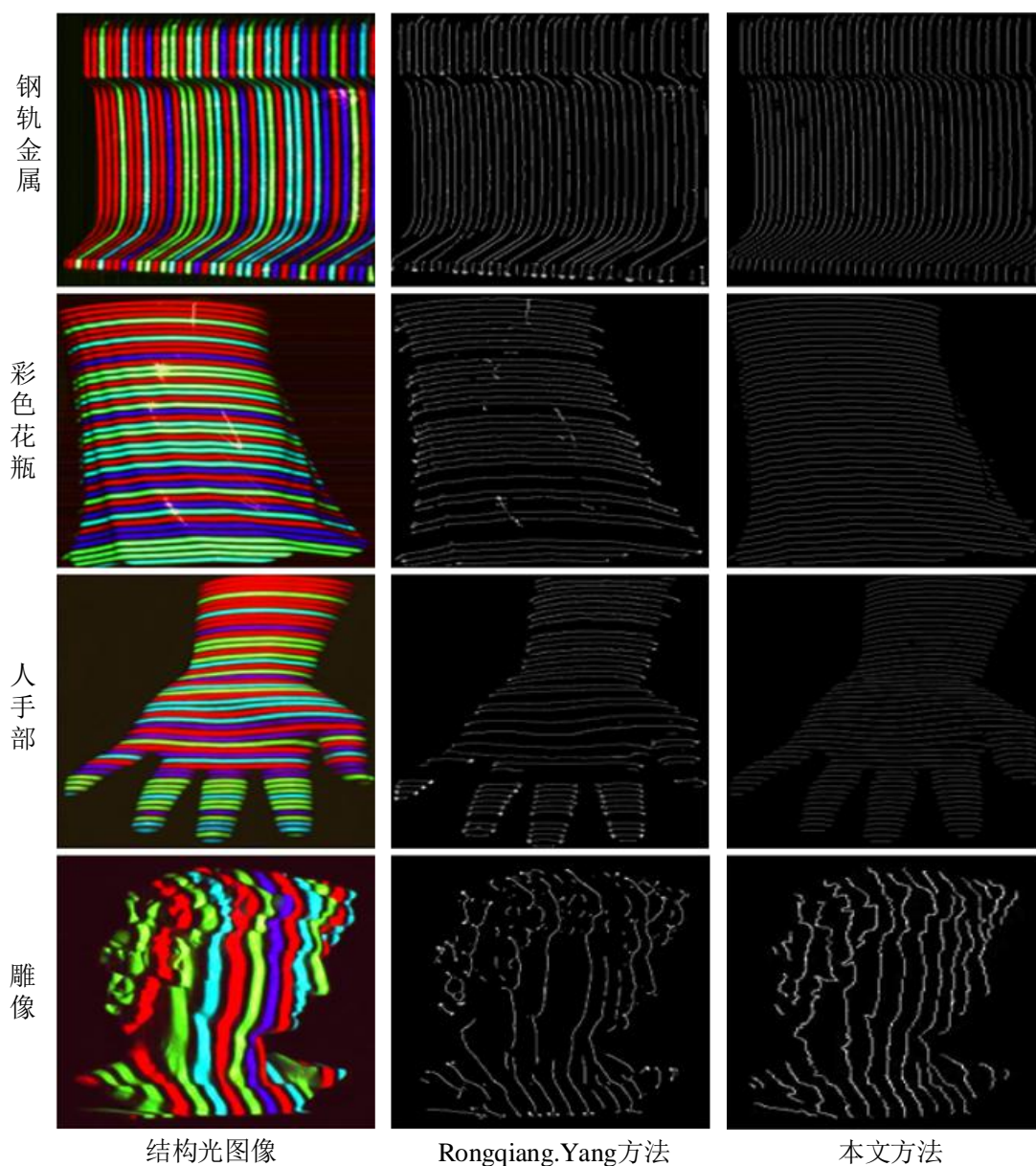


图 3-7 结构光图像特征点检测结果

Figure 3-7 Feature point detection results of structured light image

此外，为验证本文提出的特征点提取算法的精度，本文还分别统计了两种算法对同一组结构光图像提取的中心点数、错检中心点数以及错误率进行对比分析验证。其中，错检中心点数为漏检特征点数和多检特征点数的总和，漏检特征点表示的是本应是条纹的中心点但没有检测出来，错检特征点表示的是本身不是条

纹的中心点但是检测出来了和一个条纹检测出两个以上的中心点，当条纹局部颜色不均时，两种算法都会发生一定的错检情况。最后的统计结果如表 3-2 所示。

表 3-2 特征点提取算法结果比较

Table 3-2 Comparison of feature point extraction results

特征点提取算法	实验目标物体	提取特征点 总数	提取错误点 数	错误率
RongqiangYang 算法	钢轨金属	21763	1914	8.8%
本文算法	钢轨金属	25742	1021	3.9%
Rongqiang.Yang 算法	彩色花瓶	11524	1311	11.3%
本文算法	彩色花瓶	16284	1024	6.3%
Rongqiang Yang 算法	人手部	9811	945	9.6%
本文算法	人手部	15864	951	5.9%
Rongqiang Yang 算法	雕像	7785	668	8.5%
本文算法	雕像	10294	426	4.1%

从表 3-2 的统计结果可以看出，Rongqiang Yang 方法检测到的条纹中心点总数明显少于本文方法提取的总数，检测错误率也明显高于本文提出的中心点提取方法，以上的结果充分验证了本文算法的有效性。

3.4 本章小结

本章针对光照和被测物体表面纹理等因素的影响，导致结构光图像解码精度不高的问题，提出了一种基于色彩迁移技术的彩色结构光解码算法。以结构光编码图案的颜色分布为先验知识，并利用色彩迁移的方式将编码图案的颜色分布迁移到相机捕获的结构光图像上，解决了结构光图像质量不高的问题，提高了条纹中心点颜色识别的精度；其次在 *RGB* 颜色空间上提出了两步精确定位的彩色条纹中心点亚像素提取算法，有效地提高了条纹中心点提取的精度。实验结果表明，本文提出的条纹颜色识别算法和中心点坐标提取算法，降低了特征点的检测错误率，有效地提高了结构光三维重构系统的解码精度。

4 基于空间编码结构光的高精度三维重构

结构光三维重构系统主要由图像采集器(摄像机)、编码图案投影设备(投影仪)、数据处理设备(计算机)和被测物体组成^[58]。摄像机、投影仪和被测物体在系统中的位置成三角的关系,如图 4-1 所示。三维重构的过程中,首先由投影设备将事先根据编码策略生成的彩色编码图案投影到被测物体表面,编码图案会随着目标物体表面深度的不同而发生相应的形变,然后 CCD 摄像机在与投影仪主光轴成一定角度的方向,对场景中被物体表面形状调制后的结构光图像进行同步捕获,再由计算机根据解码策略找到结构光图像和投影图案之间的所有匹配点,最后基于系统标定的参数即可算出匹配点的三维坐标^[59],完成目标物体表面的三维重构。

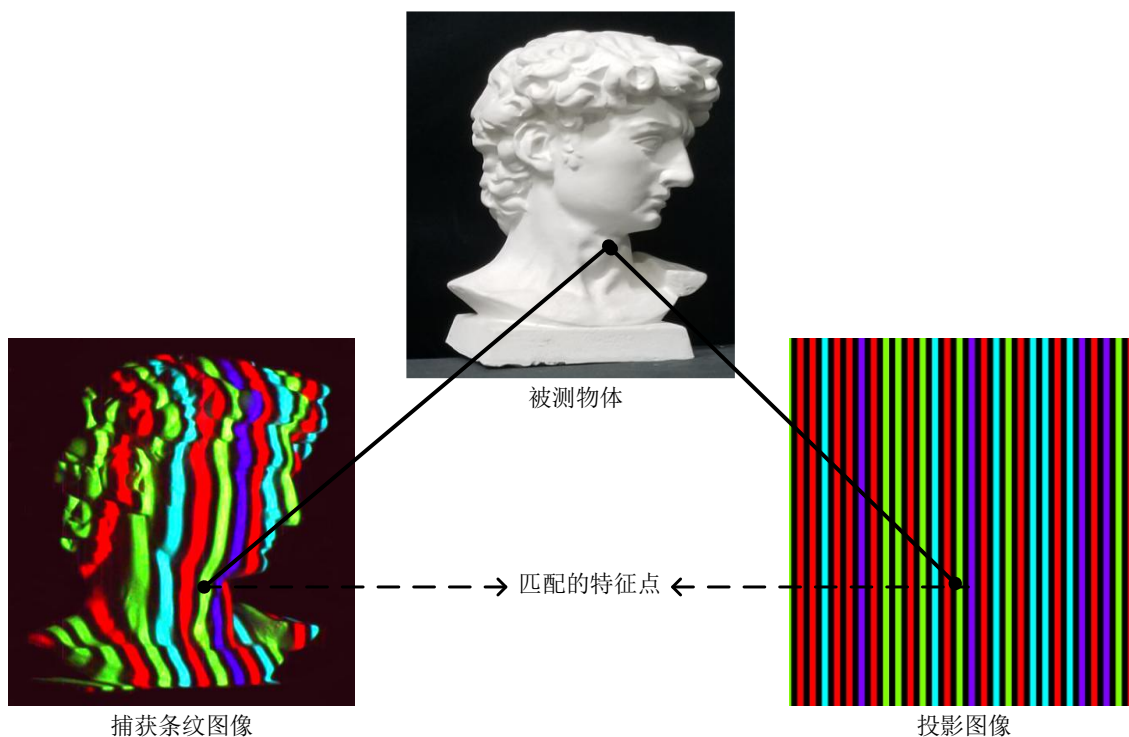


图4-1 结构光三维重构示意图

Figure 4-1 Structural light three-dimensional reconstruction schematic

空间编码结构光是结构光的编码策略之一,其特点是重构的过程中只需要一幅结构光编码图案,图案中每个特征点的编码值可以根据空间邻近点的编码值得到,因此适用于动态物体的三维重构。本文的第二章基于被测物体表面的几何特征提出了自适应结构光空间编码算法,本章基于前两章编码算法和解码算法,完成最终的目标物体表面的三维重构。如图4-2所示,在空间编码结构光三维重构系

统中，除了结构光编码算法和解码算法之外，还需要依赖于摄像机标定、投影仪标定和系统标定的结果，才能完成最后特征点三维坐标的计算。因此，高精度的标定结果是实现高精度三维重构的基础。为提高系统参数的标定，本章采用格雷码和局部单应性矩阵来计算投影平面和成像平面之间的对应关系，提高系统参数标定的精度，最后基于OpenCV和Qt，实现一套摄像机投影仪标定系统和空间编码结构光三维重构系统。

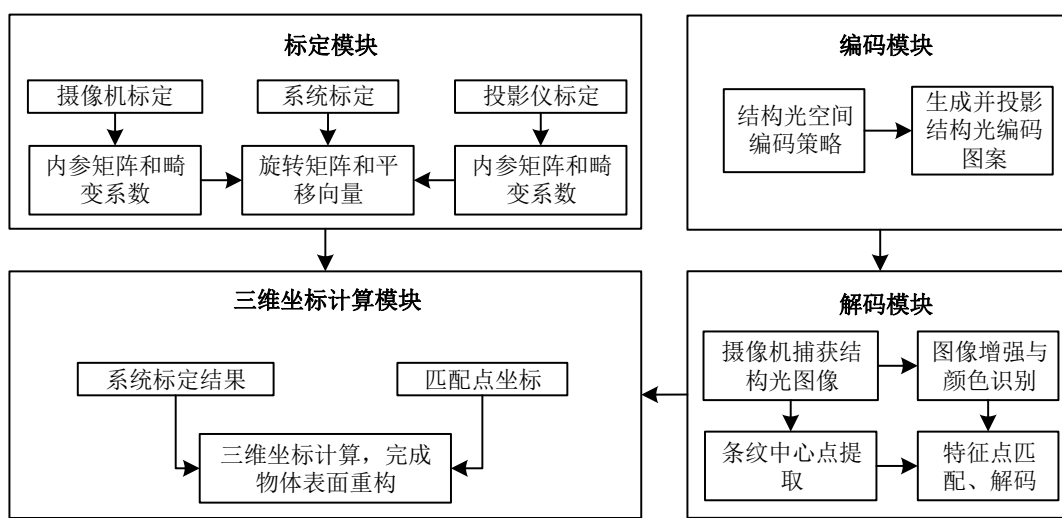


图4-2 结构光技术三维重构流程图

Figure 4-2 Structural light technology 3D reconstruction flow chart

4.1 结构光系统标定

结构光三维重构系统的采集设备主要由摄像机和投影仪组成，基于三角测量原理进行三维重构时需要知道相机和投影仪的内外参数，因此系统标定的目的就是准确求出相机和投影仪的内参矩阵以及两者之间的位置关系矩阵。

4.1.1 摄像机的光学模型

投影仪的投影光路模型是相机成像的逆过程，其光路模型与相机的成像模型完全相同。在摄像机成像过程，其实就是世界坐标系、摄像机坐标系、图像坐标系和像素坐标系之间的转换过程^{[60][61]}。假设空间点 P 在世界坐标系下的坐标为 $(X_w, Y_w, Z_w)^T$ ，摄像机成像后的二维像素坐标 $(u, v)^T$ ，则经过的步骤如下：

(1) 从世界坐标系转换到摄像机坐标系^[62]

$$\begin{bmatrix} X_c \\ Y_c \\ Z_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_1 & T_1 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_w \\ Y_w \\ Z_w \end{bmatrix} = M_1 \begin{bmatrix} X_w \\ Y_w \\ Z_w \end{bmatrix} \quad (4-1)$$

式中： R_1 为 3×3 的旋转矩阵， T_1 为 1×3 的平移向量， M_1 为摄像机外参数矩阵， $(X_c, Y_c, Z_c)^T$ 为摄像机坐标系中的坐标，为了方便分析，用齐次坐标表示为：

$$\begin{bmatrix} X_c \\ Y_c \\ Z_c \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_1 & T_1 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_w \\ Y_w \\ Z_w \\ 1 \end{bmatrix} = M_1 \begin{bmatrix} X_w \\ Y_w \\ Z_w \\ 1 \end{bmatrix} \quad (4-2)$$

(2) 从摄像机坐标系转换到图像坐标系^[63]

根据摄像机的理想成像模型可知，摄像机坐标系中的空间点 $(X_c, Y_c, Z_c)^T$ 与图像坐标系上像平面成像点 (x, y) 的转换关系如下：

$$\begin{cases} x = f \cdot \frac{X_c}{Z_c} \\ y = f \cdot \frac{Y_c}{Z_c} \end{cases} \quad (4-3)$$

其中 f 是焦距，为了便于分析，用齐次坐标和矩阵形式表示上述转换关系为：

$$Z_c \begin{bmatrix} x \\ y \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f & 0 & 0 & 0 \\ 0 & f & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_c \\ Y_c \\ Z_c \\ 1 \end{bmatrix} \quad (4-4)$$

(3) 从图像坐标系转换到像素坐标系^[64]

图像坐标系中的坐标 (x, y) 与像素坐标系中的坐标 (u, v) 满足式(4-5)

$$\begin{cases} u = \frac{x}{dx} + u_0 \\ v = \frac{y}{dy} + v_0 \end{cases} \quad (4-5)$$

式中， dx 和 dy 分别表示图像坐标系 x 轴和 y 轴方向的单位长度。为了方便，将上式用齐次坐标和矩阵形式表示为：

$$\begin{bmatrix} u \\ v \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{dx} & 0 & u_0 \\ 0 & \frac{1}{dy} & v_0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \\ 1 \end{bmatrix} \quad (4-6)$$

最后, 将式(4-1)至(4-6)进行整合, 则世界坐标系中的三维点 (X_w, Y_w, Z_w) 和成像点 (u, v) 之间的关系如式(4-7)所示。

$$\begin{aligned}
 Z_c \begin{bmatrix} u \\ v \\ 1 \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} \frac{1}{dx} & 0 & u_0 \\ 0 & \frac{1}{dy} & v_0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} f & 0 & 0 & 0 \\ 0 & f & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} R & t \\ 0^T & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_w \\ Y_w \\ Z_w \\ 1 \end{bmatrix} \\
 &= \begin{bmatrix} \alpha_x & 0 & u_0 & 0 \\ 0 & \alpha_y & v_0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} R & t \\ 0^T & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_w \\ Y_w \\ Z_w \\ 1 \end{bmatrix} = M_1 M_2 \begin{bmatrix} X_w \\ Y_w \\ Z_w \\ 1 \end{bmatrix} = M \begin{bmatrix} X_w \\ Y_w \\ Z_w \\ 1 \end{bmatrix}
 \end{aligned} \tag{4-7}$$

式子中, M_1 和 M_2 分别是摄像机的内参矩阵和外参矩阵, M 是一个 3×4 的矩阵, 该矩阵称为投影矩阵, 包含着摄像机的内部参数和外部参数。

4.1.2 摄像机标定

由摄像机的光学模型可知, 根据摄像机的投影矩阵 M , 就可以求出任意一个三维坐标点的像素坐标 (u, v) 。反之, 如果已知像素坐标和投影矩阵 M , 则求不出其三维坐标, 因为投影矩阵 M 是不可逆的, 由式(4-7)只能消去 Z_c , 只能得到关于 X_w, Y_w, Z_w 的两个线性方程。而相机标定的过程就是求解投影矩阵的过程, 需要已知的空间三维坐标点和其对应的像素坐标点建立方程组求解^{[65][66][67]}, 将式(4-7)写成如下形式:

$$Z_{Ci} \begin{bmatrix} u_i \\ v_i \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} m_{11} & m_{12} & m_{13} & m_{14} \\ m_{21} & m_{22} & m_{23} & m_{24} \\ m_{31} & m_{32} & m_{33} & m_{34} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_{Ci} \\ Y_{Ci} \\ Z_{Ci} \\ 1 \end{bmatrix} \tag{4-8}$$

(X_{Ci}, Y_{Ci}, Z_{Ci}) 为世界坐标系中第 i 个标定点的坐标, (u_i, v_i) 为其对应的图像坐标, 将式(4-8)写成方程的形式:

$$\begin{cases} Z_{Ci} u_i = m_{11} X_{Ci} + m_{12} Y_{Ci} + m_{13} Z_{Ci} + m_{14} \\ Z_{Ci} v_i = m_{21} X_{Ci} + m_{22} Y_{Ci} + m_{23} Z_{Ci} + m_{24} \\ Z_{Ci} = m_{31} X_{Ci} + m_{32} Y_{Ci} + m_{33} Z_{Ci} + m_{34} \end{cases} \tag{4-9}$$

将式 (4-9) 消去 Z_{Ci} 后得到:

$$\begin{cases} X_{Ci}m_{11} + Y_{Ci}m_{12} + Z_{Ci}m_{13} + m_{14} - u_iX_{Ci}m_{31} - u_iY_{Ci}m_{32} - u_iZ_{Ci}m_{33} = u_im_{34} \\ X_{Ci}m_{21} + Y_{Ci}m_{22} + Z_{Ci}m_{23} + m_{24} - v_iX_{Ci}m_{31} - v_iY_{Ci}m_{32} - v_iZ_{Ci}m_{33} = v_im_{34} \end{cases} \quad (4-10)$$

在标定的过程中, 假设知道 n 个三维点坐标和其相对应的像素坐标, 就可以得到 $2n$ 个关于 M 矩阵的元素的线性方程组, 求解时可令 $m_{34} = 1$, 其中还包含 11 个未知量, 至少由空间中的 6 个点及其对应的像素来构建方程组, 如式(4-11)所示。

$$\begin{bmatrix} X_{w1}X_{w1}X_{w1} & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -u_1X_{w1} & -u_1Y_{w1} & -u_1Z_{w1} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & X_{w1} & Y_{w1} & Z_{w1} & 1 & -v_1X_{w1} & -v_1Y_{w1} & -v_1Z_{w1} \\ & & & & & & & & & & \\ & & & & & & & & & & \\ & & & & & & & & & & \\ X_{wn}X_{wn}X_{wn} & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -u_nX_{wn} & -u_nY_{wn} & -u_nZ_{wn} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & X_{wn} & Y_{wn} & Z_{wn} & 1 & -v_nX_{wn} & -v_nY_{wn} & -v_nZ_{wn} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} m_{11} \\ m_{12} \\ m_{13} \\ m_{14} \\ m_{21} \\ m_{22} \\ m_{23} \\ m_{24} \\ m_{31} \\ m_{32} \\ m_{33} \\ m_{34} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} u_1m_{34} \\ v_1m_{34} \\ \dots \\ \dots \\ \dots \\ \dots \\ \dots \\ \dots \\ \dots \\ \dots \\ u_nm_{34} \\ v_nm_{34} \end{bmatrix} \quad (4-11)$$

本文在进行摄像机标定时, 利用标定板来建立三维坐标点和像素坐标点之间的关系, 标定板特征角点的检测结果如图4-3所示。通常, 世界坐标系的原点定义在标定板最左上角的特征角点上, z 轴垂直于标定板, 由已知的黑格子的宽度和高度, 就能精确获得每个特征角点的世界坐标, 再对摄像机捕获的标定板图像进行特征角点检测, 获得每个特征角点的像素坐标, 即可建立公式(4-11)中特征角点世界坐标和像素坐标之间的关系, 最后通过解方程完成摄像机的标定。

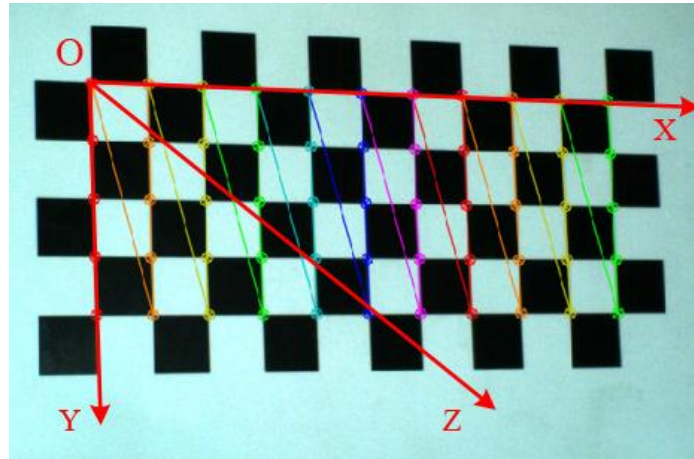


图4-3 棋盘格标定板

Figure 4-3 Checkerboard calibration board

4.1.3 投影仪标定

投影仪的光学模型与相机的光学模型完全相同，摄像机是通过棱镜将环境光汇聚到像平面上完成成像，投影仪则是将一张二维图像通过棱镜投影到三维空间中，因此投影仪投影过程是摄像机成像的逆过程，可以用相同的光学模型描述投影仪的投影过程。而根据摄像机的成像原理可知，摄像机的标定过程需要多个空间三维点坐标与其所对应的像素坐标来构建方程组，通过求解方程组的解求出内外参数。但对于投影仪来说，投影仪无法对空间三维坐标点进行成像，只能将二维的数字图像投影到三维空间中，因此本文采用局部单应性矩阵计算出摄像机成像平面上标定板特征角点的像素坐标在投影图案上的对应像素坐标，然后再基于摄像机的标定模型完成投影仪的标定。

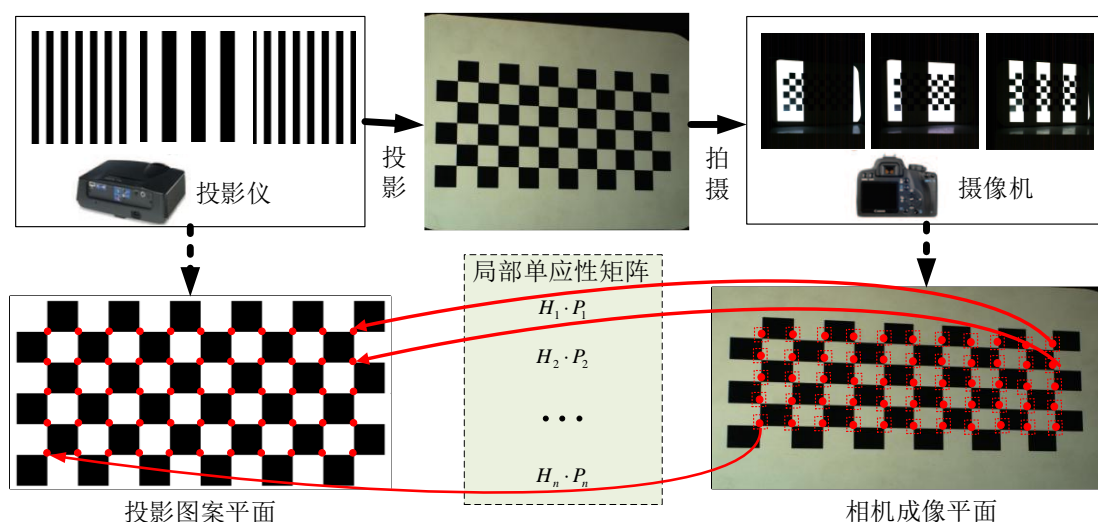


图4-4 投影仪标定过程

Figure 4-4 Projector calibration process

为了投影图案平面和三维空间坐标点之间的对应关系，提高投影仪标定的精度，本章在格雷码解码获得全局单应性矩阵的基础上，提出通过局部单应性矩阵计算每个特征角点在投影图案上更精确的像素坐标，从而实现投影仪的高精度标定，标定的步骤归纳如下：

(1) 使用投影仪将二值格雷码投影到相机标定板上，格雷码的覆盖区域必须包含标定板的所有特征角点，如图4-4所示，然后摄像机同步捕获投影了格雷码的标定板图像。

(2) 基于二值格雷码进行解码，建立投影图案平面和相机成像平面的对应关系，即全局单应性矩阵。

(3) 检测摄像机成像平面上标定板特征角点的像素坐标，如图4-4所示，并基于每个棋盘格特征角点邻域范围内的其他像素点，根据第二步的全局单应性矩阵计算每个特征角点的局部单应性矩阵。

(4) 根据摄像机成像平面上每个特征角点的像素坐标和其单应性矩阵，计算出该特征角点在投影图案上的精确像素坐标。

(5) 根据步骤(4)的精确像素坐标和已知的三维空间坐标，并基于摄像机的标定模型即可完成投影仪的标定。

投影仪的标定过程需要根据全局单应性矩阵来计算每个标定板特征角点的局部单应性矩阵，计算公式如式(4-12)所示。

$$\hat{H} = \arg \min_H \sum_{\forall p} \|q - Hp\|^2 \quad (4-12)$$

其中， $H \in R^{3 \times 3}$ ， p 是捕获图像上每个标定板特征角点邻域范围内的像素坐标， q 是通过全局单应性矩阵计算的投影图案上对应邻域范围内的像素坐标。通过求其最优化解，计算出每个标定板特征角点的局部单应性矩阵。根据局部单应性矩阵，令捕获图像上的标定板特征角点为 \bar{p} ，投影图案上准确的像素坐标为 \bar{q} ，则满足式(4-13)。

$$\bar{q} = \hat{H} \cdot \bar{p} \quad (4-13)$$

得到投影图案上特征角点的像素坐标后，根据式(4-11)建立投影仪像素坐标和世界坐标之间的关系，即可完成投影仪的标定。

4.2 三维坐标计算

基于空间编码结构光三维重构，首先需要解码模块找到结构光编码图案和摄像机捕获的结构光图像之间的匹配点坐标，再基于系统标定的参数计算出匹配点的三维坐标。假设结构光编码图案上的特征点 $(u_1, v_1, 1)$ 和结构光图像上的特征点 $(u_2, v_2, 1)$ 是一对匹配点，该匹配点在世界坐标系中的三维坐标为 $(X_w, Y_w, Z_w, 1)$ ，而三维坐标计算就是根据匹配点的像素坐标计算其三维坐标的过程。根据投影仪和摄像机的光学模型，其特征点的像素坐标和三维坐标之间的关系如式(4-14)所示^{[68][69][70]}。

$$Z_{C1} \begin{bmatrix} u_1 \\ v_1 \\ 1 \end{bmatrix} = M_1 \begin{bmatrix} X_w \\ Y_w \\ Z_w \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} m_{11}^1 & m_{12}^1 & m_{13}^1 & m_{14}^1 \\ m_{21}^1 & m_{22}^1 & m_{23}^1 & m_{24}^1 \\ m_{31}^1 & m_{32}^1 & m_{33}^1 & m_{34}^1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_w \\ Y_w \\ Z_w \\ 1 \end{bmatrix} \quad (4-14)$$

$$Z_{C2} \begin{bmatrix} u_2 \\ v_2 \\ 1 \end{bmatrix} = M_2 \begin{bmatrix} X_w \\ Y_w \\ Z_w \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} m_{11}^2 & m_{12}^2 & m_{13}^2 & m_{14}^2 \\ m_{21}^2 & m_{22}^2 & m_{23}^2 & m_{24}^2 \\ m_{31}^2 & m_{32}^2 & m_{33}^2 & m_{34}^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_w \\ Y_w \\ Z_w \\ 1 \end{bmatrix} \quad (4-15)$$

式中, m_{ij}^k 表示的是矩阵 M_k 的第 i 行和第 j 列的元素。将式(4-14)和式(4-15)整理后得到关于 X_w 、 Y_w 和 Z_w 的三元一次方程, 如式(4-16)所示:

$$\begin{cases} (u_1 m_{31}^1 - m_{11}^1)X_w + (u_1 m_{32}^1 - m_{12}^1)Y_w + (u_1 m_{33}^1 - m_{13}^1)Z_w = m_{14}^1 - u_1 m_{34}^1 \\ (v_1 m_{31}^1 - m_{21}^1)X_w + (v_1 m_{32}^1 - m_{22}^1)Y_w + (v_1 m_{33}^1 - m_{23}^1)Z_w = m_{24}^1 - v_1 m_{34}^1 \\ (u_1 m_{31}^2 - m_{11}^2)X_w + (u_1 m_{32}^2 - m_{12}^2)Y_w + (u_1 m_{33}^2 - m_{13}^2)Z_w = m_{14}^2 - u_1 m_{34}^2 \\ (v_1 m_{31}^2 - m_{21}^2)X_w + (v_1 m_{32}^2 - m_{22}^2)Y_w + (v_1 m_{33}^2 - m_{23}^2)Z_w = m_{24}^2 - v_1 m_{34}^2 \end{cases} \quad (4-16)$$

式(4-16)是一个过约束方程, 在实际的实验过程中, 由于提取特征点和匹配特征点时会含有噪声, 所以一般采用最小二乘法来求解世界坐标值, 将式(4-16)改写成矩阵的形式, 即:

$$Aq = b \quad (4-17)$$

其中:

$$A = \begin{bmatrix} u_1 m_{31}^1 - m_{11}^1 & u_1 m_{32}^1 - m_{12}^1 & u_1 m_{33}^1 - m_{13}^1 \\ v_1 m_{31}^1 - m_{21}^1 & v_1 m_{32}^1 - m_{22}^1 & v_1 m_{33}^1 - m_{23}^1 \\ u_1 m_{31}^2 - m_{11}^2 & u_1 m_{32}^2 - m_{12}^2 & u_1 m_{33}^2 - m_{13}^2 \\ v_1 m_{31}^2 - m_{21}^2 & v_1 m_{32}^2 - m_{22}^2 & v_1 m_{33}^2 - m_{23}^2 \end{bmatrix}, \quad P = \begin{bmatrix} X_w \\ Y_w \\ Z_w \end{bmatrix}, \quad b = \begin{bmatrix} m_{14}^1 - u_1 m_{34}^1 \\ m_{24}^1 - v_1 m_{34}^1 \\ m_{14}^2 - u_1 m_{34}^2 \\ m_{24}^2 - v_1 m_{34}^2 \end{bmatrix} \quad (4-18)$$

最后, 特征点的三维坐标可表示为:

$$P = (A^T A)^{-1} A^T b \quad (4-19)$$

4.3 实验结果与分析

本章主要介绍研发的摄像机和投影仪的标定系统和基于空间编码结构光的三维重构系统, 通过分析标定数据和三维重构点云数据的精度, 验证本文算法的可行性和准确性。

4.3.1 实验环境

本章实验的软件方面, 基于 OpenCV、C++、Qt 和投影仪摄像机的软件开发包, 研发了本文的摄像机和投影仪的标定系统, 能够实时采集图像进行系统标定; 此外, 还基于 PCL、VDK、OpenCV、C++和 Qt, 研发了本文的空间编码结构光三维重构

系统，能够基于单张图像进行目标物体表面的三维重构。实验的硬件方面，摄像机采用的是 CM3-U3-13Y3C-CS 工业相机，其分辨率分别为 912×1140 ；投影仪采用的是 DLP4500，分辨率是 1280×1024 。

4.3.2 标定结果对比与分析

本章基于格雷编码来完成摄像机和投影仪的标定，一共采用 42 张格雷码图案，其中水平方向和竖直方向的格雷码图案各 21 张。首先将摄像机和投影仪的位置固定好，标定板放在三个不同位置，分别将 42 张格雷码图案投影到标定板上，相机进行实时的捕获，将最后得到的 126 张图像作为标定的输入图像，三个位置下捕获的部分标定板图像如图 4-5 所示。

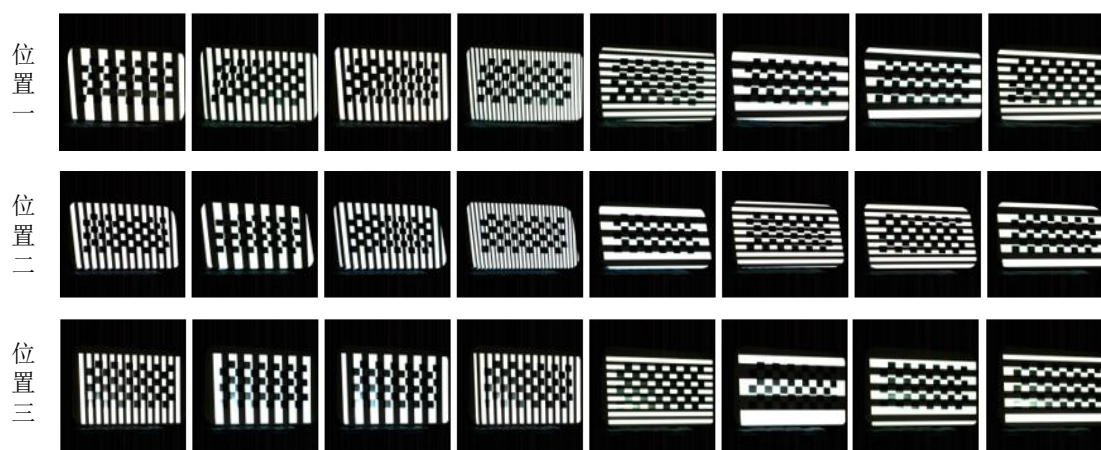


图 4-5 摄像机捕获的部分标定板图像

Figure 4-5 Part of the calibration board image captured by the camera

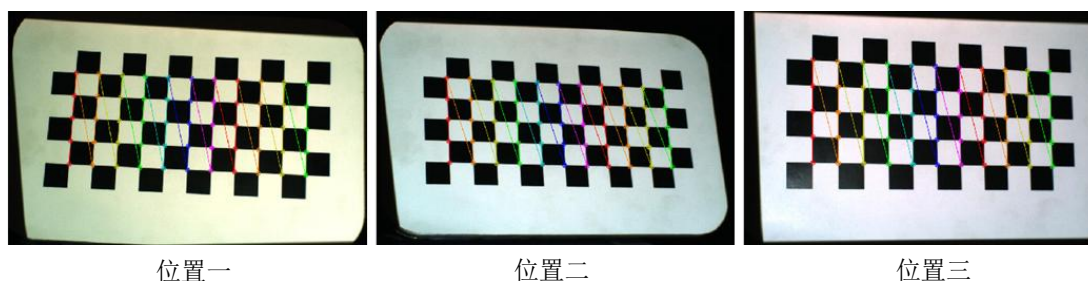


图 4-6 棋盘格角点检测结果

Figure 4-6 Checkerboard corner test results

系统标定的关键技术是对捕获的格雷码图像进行标定板特征角点坐标检测以

及计算其在投影仪投影像平面上的像素坐标。本文的标定系统首先基于 OpenCV 来完成标定板的特征角点检测，在三个不同位置对标定板特征角点的检测结果如图 4-6 所示。

完成标定板特征角点的检测之后，首先根据三个位置的捕获标定板图像进行解码，从而得到摄像机成像平面与投影图案之间的对应关系，解码得到的水平方向和竖直方向的对对应关系即为全局单应性矩阵，然后根据每个特征角点邻域范围内的其他像素点计算其局部单应性矩阵，再根据局部单应性矩阵得到每个棋盘格特征角点在投影图案上的精确像素坐标。如图 4-7 所示为三个位置在水平方向和竖直方向的解码图像，图中标出的彩色点为投影图案上特征角点的精确像素坐标。

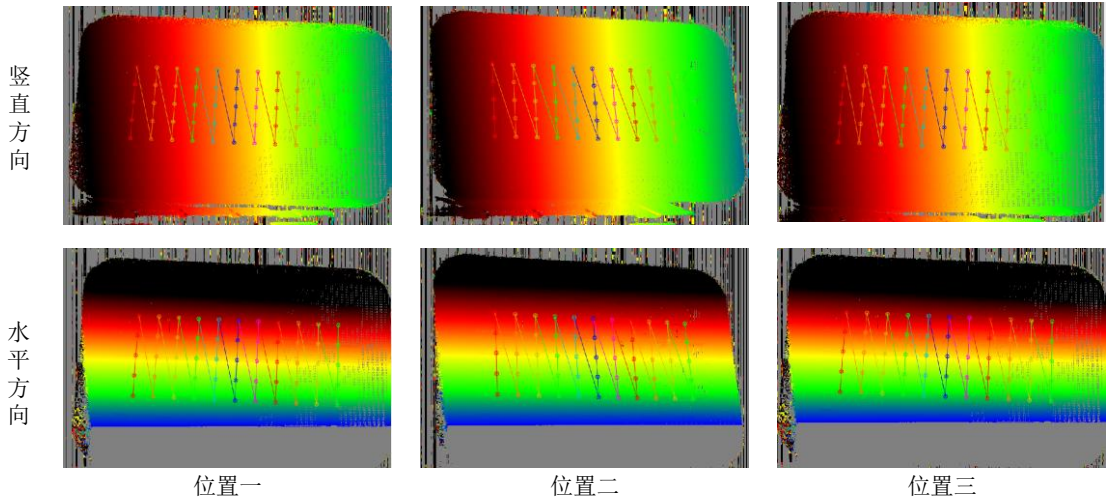


图 4-7 格雷码解码结果

Figure 4-7 Gray code decoding results

得到所有特征角点的像素坐标之后，即可根据式(4-11)完成系统参数的标定，其中标定的参数包括摄像机和投影仪的内参矩阵 M_C 和 M_P ，以及它们两者之间的旋转矩阵 R 、平移向量 T ，标定结果如式(4-20)和(4-21)所示：

$$M_C = \begin{bmatrix} 2216.8 & 0 & 501.4 \\ 0 & 2211.2 & 462.6 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad M_P = \begin{bmatrix} 1198.9 & 0 & 300.6 \\ 0 & 2370.6 & 604.6 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4-20)$$

$$R = \begin{bmatrix} -0.005 & 0.028 & 0.426 \\ -0.005 & 0.998 & -0.056 \\ -0.425 & 0.049 & 0.904 \end{bmatrix} \quad T = [-286.19 \quad -5.432 \quad -339.495] \quad (4-21)$$

除了得到需要的标定参数之外，本文还比较了基于局部单应性矩阵标定方法和直接基于全局单应性标定方法之间的重投影误差，其比较结果如表 4-1 所示。从

比较结果可以得出，本章在全局单应性的基础上采用局部单应性矩阵来计算特征点的精确像素坐标，能够有效降低投影仪的重投影误差，从 1.561 降到了 0.412，而摄像机标定是直接基于检测到的特征角点坐标进行标定，因此两种方法的误差基本一致。

表 4-1 标定重投影误差比较

Table 4-1 Calibration re-projection error comparison

方法	投影仪标定重投影误差	摄像机标定重投影误差
全局单应性矩阵	1.561 pixel	0.149 pixel
局部单一性矩阵	0.412 pixel	0.134 pixel

4.3.3 三维重构结果对比与分析

为验证本文编解码算法和编码算法的精度与有效性，本章研发了一套基于空间编码结构光的三维重构系统，该系统能对摄像机和投影仪进行实时标定，同时还能基于单张结构光图像对物体目标表面进行三维重构，并对重构的三维点云数据进行实时展示。该系统的硬件设备和软件界面如图 4-8 所示。

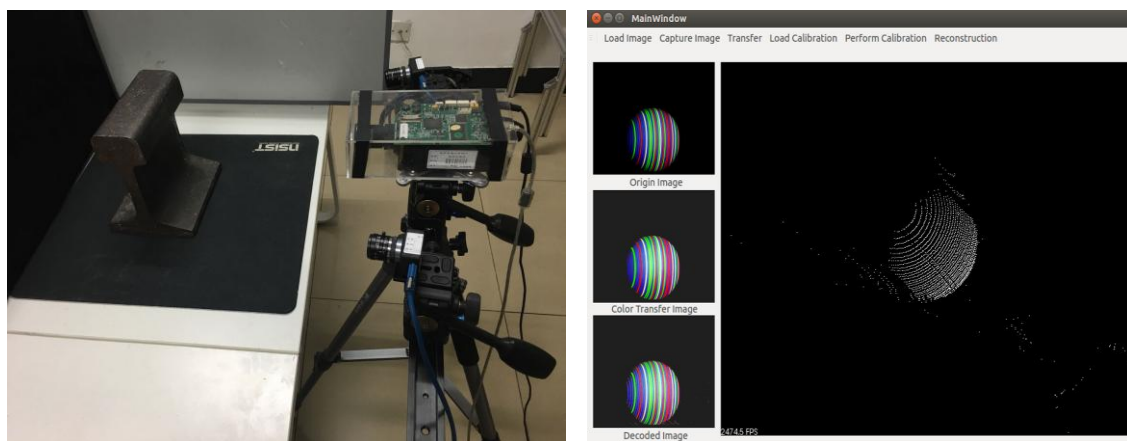


图 4-8 硬件设施和系统界面图

Figure 4-8 Hardware facilities and system interface diagram

利用本章研发的空间编码结构光三维重构系统，在实验室环境下进行了多组三维重构实验，分别对光滑球面、彩色花瓶和表面粗糙的钢轨金属进行表面三维重构。这些被测物体的几何形状差异性较大，材质和表面纹理也各不相同，都各具有代表性，能够验证本文提出算法的鲁棒性。另外，本章还通过对比三维重构后的测量数据和物体真实的数据，验证本文三维重构算法的精度。如图 4-9 所示为重构的

目标物体和摄像机捕获的结构光图像。

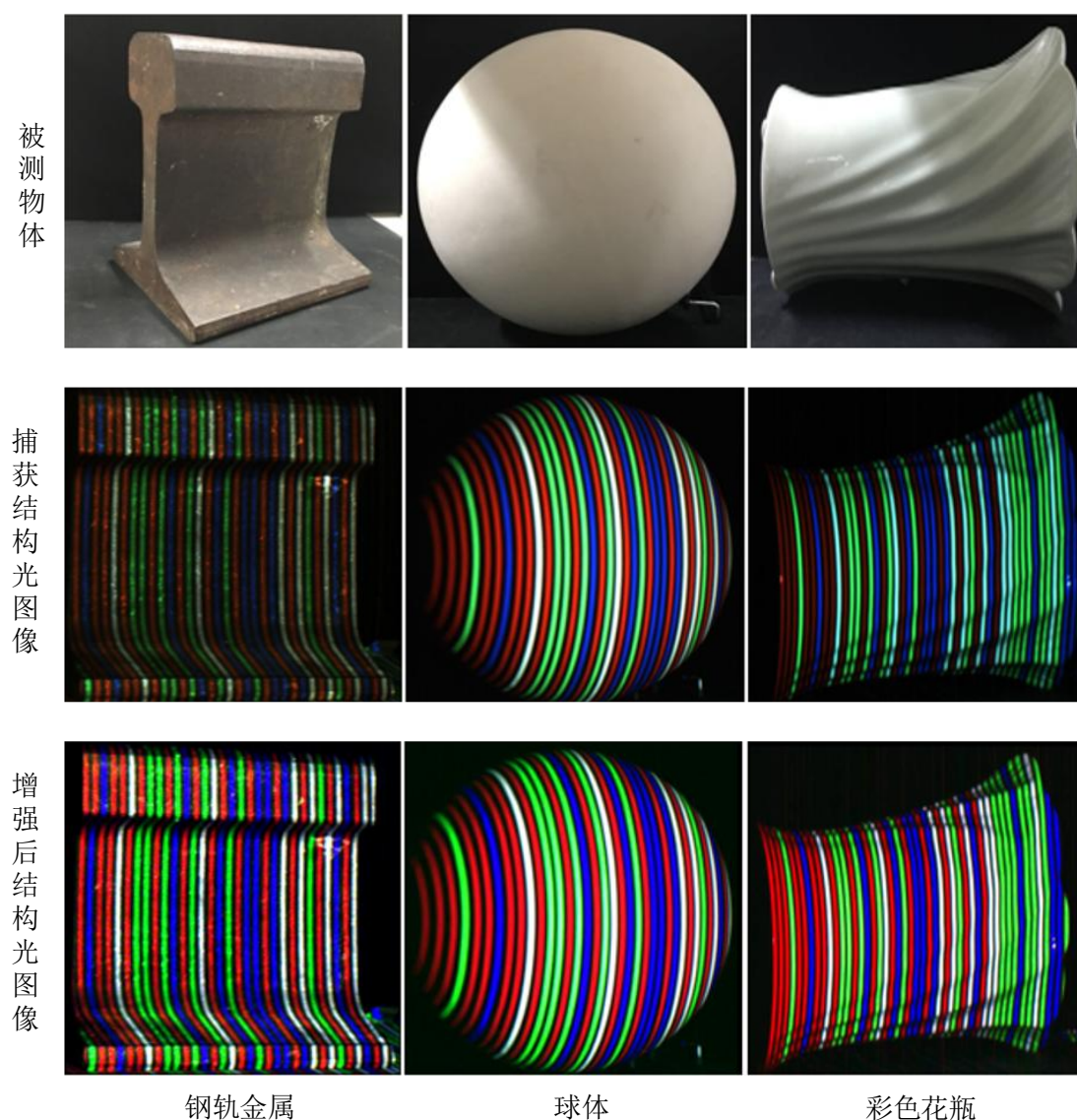


图 4-9 被测物体和摄像机捕获的结构光图像及其增强后的结果

Figure 4-9 Measured object and a structured light image captured by a camera and the result of enhanced structured light image by color transfer

如图 4-9 所示，第一行是被测物体，第二行是摄像机分别对钢轨金属、光滑球面和彩色花瓶捕获的结构光图像，对于相机捕获的结构光图像，首先利用本文第三章提出的基于色彩迁移技术的彩色结构光解码算法，对结构光图像进行图像增强和颜色识别，完成解码，其增强的结果如图 4-9 的第三行所示，然后基于本章实现的标定系统和空间编码结构光三维重构系统，计算出目标物体表面的三维点云数据，最终完成物体表面三维重构，重构的结果如图 4-10 所示。此外，为了验证本

文提出算法的三维重构精度，本章还分别统计了三维点云数据的个数、平均误差、标准误差和物体尺寸测量结果来进行验证，统计结果如表 4-2 所示。

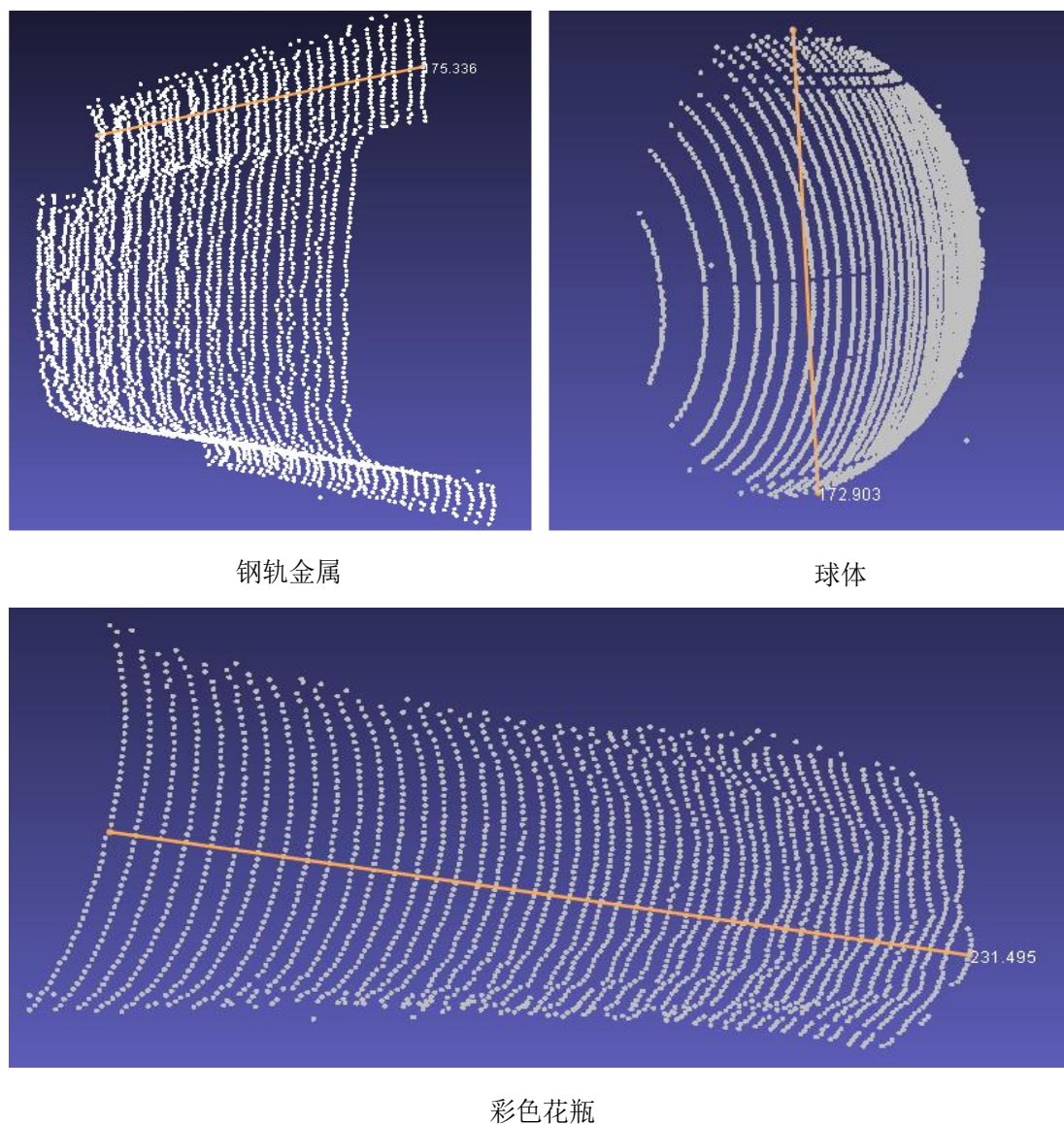


图 4-10 三维重构结果

Figure 4-10 Three-dimensional reconstruction results

从三维重构结果和表 4-2 的统计结果可以看出，本文提出的空间编码结构光重构的点云数量都在一万五以上，另外，通过平均误差和标准误差可以说明本文的重构算法精度较高，重构后基于点云数据测得的物体长度与物体实际的长度误差较小，都保持在 3mm 的误差范围内，通过这些实验数据，充分验证了本文提出的算法有效地提高了三维重构的精度。

表 4-2 三维点云数据统计结果和测量结果

Table 4-2 Three-dimensional point cloud data statistics and measurement results

目标物体	点云数量	平均误差	标准误差	测量长度	实际长度
钢轨金属	18750	0.45mm	0.32mm	75.336mm	75.9mm
球体	15450	0.35mm	0.29mm	172.903mm	173.1mm
彩色花瓶	20123	0.41mm	0.35mm	231.495mm	231.7mm

4.4 本章小结

本章详细讨论了摄像机和投影仪的光学模型，以及摄像机成像过程中各个坐标系之间的转换关系，并实现了结构光系统参数的高精度标定。此外，本章还详细介绍了结构光三维重构的基本原理和三维坐标的计算过程，并研发了一套结构光三维重构系统。通过最后的实验对比，证实了本文的结构光编解码算法在提高结构光三维重构精度方面有一定的可行性和创新性。然而基于结构光三维重构的重构方法由于环节众多，每个环节都有可能带来不确定的误差，虽然本文在编解码算法上提出了一些创新性的思路来提高重构的精度，但也还有很多需要完善的地方。

5 工作总结与展望

本章主要对全文的工作进行总结，总结本文的研究内容和创新点，并对下一步的研究提一些建议和展望。

5.1 工作总结

本文以提高空间编码结构光三维重构的精度为目标，分别对几个影响重构精度的关键技术进行深入的研究，并进行相应性的创新和改进，分别提出了基于几何特征的自适应结构光空间编码算法和基于色彩迁移技术的彩色结构光解码算法，并实现了空间编码结构光三维重构系统和标定系统。通过对多个不同物体进行表面的三维重构与测量，实验结果也验证了本文算法的正确性和有效性。创新点有以下几点：

(1) 在结构光编码方面，针对具体的应用场合，提出一种基于几何特征的自适应结构光空间编码算法。DeBruijn 序列空间编码与传统的时间编码相比，能在多相机多投影仪的条件下实现运动物体的全表面重构，但存在分辨率低的问题，因此提出一种自适应结构光空间编码算法。首先基于本文提出的条纹密集度特征，计算捕获结构光图像中条纹的密集程度，若密集程度与设定的阈值不符，则再基于目标表面几何特征投影模型的反馈信息对初始投影图案的条纹间距进行不断迭代调节，直至捕获的结构光图像密集度特征满足设定的阈值，最后获得高分辨率的自适应结构光空间编码图案，提高三维重构的精度。

(2) 在结构光解码方面，针对物体表面纹理和光照的影响导致解码精度不高的问题，提出一种基于色彩迁移技术的结构光解码算法。首先，以结构光编码图案的颜色分布为先验知识，利用色彩迁移的方式对相机捕获的结构光图像进行增强和去光照处理，还原结构光图像的条纹颜色信息；其次，提出了两步精确定位的彩色结构光图像条纹中心点亚像素提取算法，继而准确提取条纹的中心坐标，实现高精度解码。

(3) 在基于空间编码结构光的高精度三维重构方面，设计并实现了一套基于 DeBruijn 序列空间编码结构光的高精度三维重构系统。首先基于本文的编解码算法实现结构光的高精度编码和解码，然后利用格雷编码和局部单应性矩阵求解标定板特征角点在投影仪投影平面上的精确像素坐标，再基于张正友及系统标定原理实现投影仪和结构光系统的高精度标定，最后基于高精度编解码结果和高精度系统标定结果，实现目标表面的高精度三维重构。

5.2 进一步的研究建议

本文对提高空间编码结构光三维重构精度的问题，分别在结构光编码算法、结构光解码算法和三维坐标计算等方面进行了深入的研究，并对相应的算法进行了改进，实验结果也验证了本文提出的改进确实有效地提高了三维重构的精度。但在未来的研究中，仍可以在本文的基础上做进一步的改进，建议总结如下：

(1) 本文的自适应结构光编码算法目前只考虑了目标物体的几何特征，只针对几何特征进行编码图案条纹间距的调节，但还未考虑被测物体表面的纹理特征对条纹颜色的自适应调节。因此，未来的自适应结构光编码算法应该结合几何特征和纹理特征，增加算法的鲁棒性。

(2) 本文的色彩迁移技术彩色结构光图像增强算法，直接对整幅结构光图像进行迁移处理，可能会出现局部增强效果不好的情况，在未来的改进算法中，可在此基础上基于一定策略进行局部划分，再对每一个局域单独进行迁移，进一步提高颜色识别的精度。

(3) 目前的三维重构系统只能对被测物体的一个局部表面进行三维重构，在未来的研发中，可以添加多个结构光重构单元，再添加多视角多片点云的拼接模块，最终实现动态物体全表面立体实时三维重构。

参考文献

- [1] 张广军. 视觉测量[M]. 科学出版社, 2008.
- [2] 于晓洋, 张键. 结构光三维视觉技术的进展[J]. 宇航计测技术, 1997(5):43-48.
- [3] 曲学军, 张璐. 基于双目视觉的三维测量方法[J]. 计算机仿真, 2011, 28(2):373-377.
- [4] 阳鹏程. 基于双目结构光的三维测量技术研究[D]. 浙江大学, 2014.
- [5] Kawasaki H, Furukawa R, Sagawa R, et al. Dynamic scene shape reconstruction using a single structured light pattern[C]// Computer Vision and Pattern Recognition, 2008. CVPR 2008. IEEE Conference on. IEEE, 2008:1-8.
- [6] Geng J. Structured-light 3D surface imaging: a tutorial[J]. Advances in Optics & Photonics, 2011, 3(2):128-160.
- [7] 揭平良. 结构光双目视觉重构系统的研究[D]. 广东工业大学, 2014.
- [8] Salvi J, Fernandez S, Pribanic T, et al. A state of the art in structured light patterns for surface profilometry[J]. Pattern Recognition, 2010, 43(8):2666-2680.
- [9] Salvi J, Pagès J, Batlle J. Pattern codification strategies in structured light systems[J]. Pattern Recognition, 2004, 37(4):827-849.
- [10] Zanuttigh P, Mutto C D, Minto L, et al. Time-of-flight and structured light depth cameras: Technology and applications[C]// Springer Publishing Company, Incorporated, 2016.
- [11] Benveniste R, Ünsalan C. Nary coded structured light-based range scanners using color invariants[J]. Journal of Real-Time Image Processing, 2014, 9(2):359-377.
- [12] Navarro S F. One-shot pattern projection for dense and accurate 3D reconstruction in structured light[J]. Tdx, 2012.
- [13] Minou M, Kanade T, Sakai T. METHOD OF TIME-CODED PARALLEL PLANES OF LIGHT FOR DEPTH MEASUREMENT[C]// 1981:521-528.
- [14] Inokuchi S, Sato K, Matsuda F. Range imaging system for 3-d object recognition[C]// 1984:1443-1454.
- [15] Rocchini C, Cignoni P, Montani C, et al. A low cost optical 3D scanner.[J]. Computer Graphics Forum, 2001.
- [16] Caspi D, Kiryati N, Shamir J. Range Imaging With Adaptive Color Structured Light[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis & Machine Intelligence, 1998, 20(5):470-480.
- [17] Horn E, Kiryati N. Toward Optimal Structured Light Patterns[C]// International Conference on Recent Advances in 3-D Digital Imaging and Modeling. IEEE Computer Society, 1997:28.
- [18] Peng T. Algorithms for Generating Adaptive Projection Patterns for 3D Shape Measurement[J]. Journal of Computing & Information Science in Engineering, 2007, 8(3):693-705.
- [19] Carrihill B, Hummel R. Experiments with the intensity ratio depth sensor[J]. Computer Vision Graphics & Image Processing, 1985, 32(3):337-358.
- [20] Wong A K C, Niu P, He X. Fast acquisition of dense depth data by a new structured light scheme[J]. Computer Vision & Image Understanding, 2005, 98(3):398-422.
- [21] Tajima J, Iwakawa M. 3-D data acquisition by Rainbow Range Finder[M]. 1990.
- [22] Geng Z J. Rainbow 3-dimensional camera: New concept of high-speed 3-dimensional vision

- systems[J]. Optical Engineering, 1996.
- [23] Sato T. Multispectral pattern projection range finder[C]// Conference on Three-Dimensional Image Capture and Applications II, San Jose, Ca, Usa, January. DBLP, 1999:28-37.
- [24] Boyer K L, Kak A C. Color-Encoded Structured Light for Rapid Active Ranging[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis & Machine Intelligence, 1987, PAMI-9(1):14-28.
- [25] Durdle N G, Thayyoor J, Raso V J. An improved structured light technique for surface reconstruction of the human trunk[C]// Electrical and Computer Engineering, 1998. IEEE Canadian Conference on. IEEE, 1998:874-877 vol.2.
- [26] Chen C S, Hung Y P, Chiang C C, et al. Range data acquisition using color structured lighting and stereo vision[J]. Image & Vision Computing, 1997, 15(6):445-456.
- [27] Koninckx T P, Gool L V. Real-Time Range Acquisition by Adaptive Structured Light[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis & Machine Intelligence, 2006, 28(3):432-445.
- [28] F.J. MacWilliams, N.J.A. Sloane. Pseudo-random sequences and arrays[J]. Proceedings of the IEEE, 2005, 64(12):1715-1729.
- [29] Zhang L, Curless B, Seitz S M. Rapid shape acquisition using color structured light and multi-pass dynamic programming[C]// International Symposium on 3d Data Processing Visualization and Transmission, 2002. Proceedings. IEEE, 2002:24-36.
- [30] Salvi J, Batlle J, Mouaddib E. A robust-coded pattern projection for dynamic 3D scene measurement[J]. Pattern Recognition Letters, 1998, 19(11):1055-1065.
- [31] Cheng F H, Lu C T, Huang Y S. 3D Object Scanning System by Coded Structured Light[J]. Third International Symposium on Electronic Commerce & Security, 2010:213-217.
- [32] Pages J, Salvi J, Garcia R, et al. Overview of coded light projection techniques for automatic 3D profiling[C]// IEEE International Conference on Robotics and Automation, 2003. Proceedings. ICRA. IEEE, 2003:133-138 vol.1.
- [33] Oki Y, Visentini-Scarzanella M, Wada T, et al. Entire shape scan system with multiple pro-cams using texture information and accurate silhouette creating technique[C]// Iapr International Conference on Machine Vision Applications. IEEE, 2015:18-21.
- [34] Griffin P M, Narasimhan L S, Yee S R. Generation of uniquely encoded light patterns for range data acquisition[J]. Pattern Recognition, 1992, 25(25):609-616.
- [35] Spoelder H J W, Vos F M, Petrin E M, et al. Some aspects of pseudo random binary array-based surface characterization[J]. Instrumentation & Measurement IEEE Transactions on, 2000, 49(6):1331-1336.
- [36] Morano R A, Ozturk C, Conn R, et al. Structured light using pseudorandom codes[J]. Pattern Analysis & Machine Intelligence IEEE Transactions on, 1998, 20(3):322-327.
- [37] Chen S Y, Li Y F, Zhang J. Realtime Structured Light Vision with the Principle of Unique Color Codes[C]// IEEE International Conference on Robotics and Automation. IEEE, 2007:429-434.
- [38] Albitar C, Graebing P, Doignon C. Design of a Monochromatic Pattern for a Robust Structured Light Coding[C]// IEEE International Conference on Image Processing. IEEE, 2007:VI - 529-VI - 532.
- [39] Song Z, Chung C K. Determining both surface position and orientation in structured-light-based sensing[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis & Machine Intelligence, 2010, 32(10):1770-1780.

- [40] Lin H, Nie L, Song Z. A single-shot structured light means by encoding both color and geometrical features[J]. Pattern Recognition, 2015, 54:178-189.
- [41] Thabet A K, Emanuele T, Joaquim S, et al. Dynamic 3D shape of the plantar surface of the foot using coded structured light: a technical report[J]. Journal of Foot & Ankle Research, 2014, 7(1):5.
- [42] Monks T P, Carter J N. Improved stripe matching for colour encoded structured light[C]// Computer Analysis of Images and Patterns, International Conference, Caip'93, Budapest, Hungary, September 13-15, 1993, Proceedings. DBLP, 1993:476-485.
- [43] Pagès J, Salvi J, Collewet C, et al. Optimised De Bruijn patterns for one-shot shape acquisition[J]. Image & Vision Computing, 2005, 23(8):707-720.
- [44] 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.
- [45] Lim J, Ryu M. Optimized projection patterns for stereo systems[M]. Butterworth-Heinemann, 2015.
- [46] Zhang L, Curless B, Seitz, S.M. Rapid shape acquisition using color structured light and multi-pass dynamic programming[C]// International Symposium on 3d Data Processing Visualization and Transmission, 2002. Proceedings. IEEE, 2016:24-36.
- [47] Chen X, Wang X, Cao Y, et al. Color structure-light stripe center-line extraction method research[C]// Control Conference. IEEE, 2015:3686-3689.
- [48] Tian Q, Yang Y, Zhang X, et al. Extraction of Light Stripe Centerline Based on Self-adaptive Thresholding and Contour Polygonal Representation[C]// International Conference on Digital Human Modeling and Applications in Health, Safety, Ergonomics and Risk Management. Springer Berlin Heidelberg, 2013:292-301.
- [49] Wu F, Dong W, Mei X, et al. Distribution-aware image color transfer[C]// Siggraph Asia Sketches. 2011:1-2.
- [50] 王灿进, 孙涛, 陈娟. 基于方向滤波器组的激光主动成像图像复原[J]. 中国激光, 2014, 41(8):57-63.
- [51] 王吉林, 赵力. 一种改进的自适应图像颜色迁移算法[J]. 计算机测量与控制, 2012, 20(1):247-249.
- [52] Pang X M, Min Z J, Kan J M. Color image segmentation based on HSI and LAB color space[J]. Journal of Guangxi University, 2011, 36(6):976-980.
- [53] Muhammad K, Ahmad J, Sajjad M, et al. Evaluating the Suitability of Color Spaces for Image Steganography and Its Application in Wireless Capsule Endoscopy[C]// International Conference on Platform Technology and Service. IEEE, 2016:1-3.
- [54] Li Y, Zhou J, Huang F, et al. Sub-Pixel Extraction of Laser Stripe Center Using an Improved Gray-Gravity Method[J]. Sensors, 2017, 17(4).
- [55] Mei T, Zhong S, He D. Structured light stripe detection under variable ambient light[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2011, 32(12):2794-2801.
- [56] Zhang Z. A Flexible New Technique for Camera Calibration[M]. IEEE Computer Society, 2000.
- [57] JosephLim, deHarak. On Edwin H. Land's Retinex Theory: Developing a Classroom Demonstration for Color Vision[J]. 2012.
- [58] 耿飞. 基于彩色条纹结构光的三维重建方法研究[D]. 东北大学, 2008.
- [59] 田维真. 基于结构光三维视觉理论的三维重建方法研究[D]. 吉林大学, 2011.

- [60] Wei G Q, Ma S D. Implicit and explicit camera calibration: theory and experiments[J]. Pattern Analysis & Machine Intelligence IEEE Transactions on, 1994, 16(5):469-480.
- [61] 高宏伟, 吴成东, 李斌. Camera calibration method for optical center[J]. 光电工程, 2006, 33(7):68-73.
- [62] Semeniuta O. Analysis of Camera Calibration with Respect to Measurement Accuracy ☆[J]. Procedia Cirp, 2016, 41:765-770.
- [63] Tian S X, Lu S, Liu Z M. Levenberg-Marquardt algorithm based nonlinear optimization of camera calibration for relative measurement[C]// Control Conference. IEEE, 2015:4868-4872.
- [64] Salvi J, Armangué X, Batlle J. A comparative review of camera calibrating methods with accuracy evaluation ☆[J]. Pattern Recognition, 2002, 35(7):1617-1635.
- [65] Han A D, Chimienti A, Menga G. Improving calibration accuracy of structured light systems using plane- based residual error compensation[J]. Optical Engineering, 2013, 52(10):104106,1-9.
- [66] Legardasáenz R, Bothe T, Jüptner W P O. Accurate procedure for the calibration of a structured light system[J]. Optical Engineering, 2004, 43(2):464-471.
- [67] Li H, Straub R, Prautzsch H. Fast subpixel accurate reconstruction using color structured light[J]. Acta Press, 2007.
- [68] Ito M, Shimizu T, Ito A, et al. 807 Three Dimensional Measurement using stereo-camera : Three Dimensional Coordinate calculation by Compound Ratio and Measurement Standard[C]// 山梨講演会講演論文集 : Yamanashi district conference. The Japan Society of Mechanical Engineers, 2011:234-235.
- [69] 陈彦军. 基于编码结构光的三维重建关键技术研究[D]. 哈尔滨工业大学, 2012.
- [70] 龚亚非. 基于编码结构光的三维重建系统研究[D]. 长安大学, 2014.

作者简历及攻读硕士学位期间取得的研究成果

一、作者简历

作者：白宏运

性别：男

出生年月：1992 年 10 月

教育经历：

2011 年 9 月 - 2015 年 7 月 天津工业大学 理学院 信息与计算科学 获理学学士学位。

2015 年 9 月 - 2018 年 3 月 北京交通大学 计算机与信息技术学院 软件工程 攻读工学硕士学位。

二、发表论文

[1] 白宏运, 许宏丽, 黄华. 一种基于色彩迁移技术的DeBruijn 彩色结构光解码算法[J]. 激光与光电子学进展, 2018, 55(1): 011013.

三、参与科研项目

[1] 基于计算机视觉的高速铁路轮轨接触关系检测关键技术研究(No:K16JB00240)

[2] 科研课题软件开发 (No: KKL16020530)

独创性声明

本人声明所呈交的学位论文是本人在导师指导下进行的研究工作和取得的研究成果，除了文中特别加以标注和致谢之处外，论文中不包含其他人已经发表或撰写过的研究成果，也不包含为获得北京交通大学或其他教育机构的学位或证书而使用过的材料。与我一同工作的同志对本研究所做的任何贡献均已在论文中作了明确的说明并表示了谢意。

学位论文作者签名：白展远 签字日期：2018 年 3 月 11 日

学位论文数据集

表 1.1: 数据集页

关键词*	密级*	中图分类号	UDC	论文资助
空间编码结构光；自适应；DeBruijn；色彩迁移；高精度；三维重构	公开	TP391		基于计算机视觉的高速铁路轮轨接触关系检测关键技术研究(No: K16JB00240)
学位授予单位名称*		学位授予单位代码*	学位类别*	学位级别*
北京交通大学		10004	工学	硕士
论文题名*		并列题名		论文语种*
基于空间编码结构光的高精度三维重构关键技术研究				中文
作者姓名*	白宏运		学号*	15120482
培养单位名称*	培养单位代码*		培养单位地址	邮编
北京交通大学	10004		北京市海淀区西直门外上园村 3 号	100044
学科专业*	研究方向*		学制*	学位授予年*
计算机科学与技术	计算机视觉		2.5 年	2018
论文提交日期*	2018 年 3 月			
导师姓名*	许宏丽		职称*	教授
评阅人	答辩委员会主席*		答辩委员会成员	
	何永忠		张英俊、范辉	
电子版论文提交格式 文本 (√) 图像 () 视频 () 音频 () 多媒体 () 其他 () 推荐格式: application/msword; application/pdf				
电子版论文出版 (发布) 者		电子版论文出版 (发布) 地		权限声明
论文总页数*	72			
共 33 项, 其中带*为必填数据, 为 21 项。				