

# 动态场景的三维信息 获取原理和技术

许丽 著



中国水利水电出版社  
[www.waterpub.com.cn](http://www.waterpub.com.cn)

# 动态场景的三维信息获取 原理和技术

许丽 著



中国水利水电出版社  
[www.waterpub.com.cn](http://www.waterpub.com.cn)

· 北京 ·

## 内 容 提 要

本书较为全面地介绍了基于视觉的动态场景的三维信息获取的基本原理、基本技术和基本方法。全书共6章,内容包括绪论、实时编码光设计、结构光系统标定方法的研究、结构光系统误差传递分析与结构优化、稀疏数据的实时多场景配准、实时结构光实验系统。内容基本上涵盖了编码结构光技术的知识专题及发展动向。

本书内容新颖,语言精练,表述通俗,图文并茂,注重实践,系统性强。

本书可作为高等院校信息工程、计算机科学与技术、电子工程、信号与信息处理、模式识别与智能系统、生物医学工程、遥感等专业师生的教材,也可供计算机视觉、人工智能、机器人等相关领域的科技工作人员参考。

## 图书在版编目(CIP)数据

动态场景的三维信息获取原理和技术 / 许丽著. --  
北京:中国水利水电出版社, 2018.8  
ISBN 978-7-5170-6728-3

I. ①动… II. ①许… III. ①计算机视觉—信息资源—信息获取 IV. ①TP302.7

中国版本图书馆CIP数据核字(2018)第185604号

策划编辑:石永峰/向辉 责任编辑:张玉玲 加工编辑:孙 丹 封面设计:李 佳

|      |                                                                                                                                                                                                                                                                                                 |
|------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 书 名  | 动态场景的三维信息获取原理和技术<br>DONGTAI CHANGJING DE SANWEI XINXI HUOQU YUANLI<br>HE JISHU                                                                                                                                                                                                                  |
| 作 者  | 许丽 著                                                                                                                                                                                                                                                                                            |
| 出版发行 | 中国水利水电出版社<br>(北京市海淀区玉渊潭南路1号D座 100038)<br>网址: <a href="http://www.waterpub.com.cn">www.waterpub.com.cn</a><br>E-mail: <a href="mailto:mchannel@263.net">mchannel@263.net</a> (万水)<br><a href="mailto:sales@waterpub.com.cn">sales@waterpub.com.cn</a><br>电话: (010) 68367658 (营销中心)、82562819 (万水) |
| 经 售  | 全国各地新华书店和相关出版物销售网点                                                                                                                                                                                                                                                                              |
| 排 版  | 北京万水电子信息有限公司                                                                                                                                                                                                                                                                                    |
| 印 刷  | 三河市兴国印务有限公司                                                                                                                                                                                                                                                                                     |
| 规 格  | 170mm×240mm 16开本 9.75印张 116千字                                                                                                                                                                                                                                                                   |
| 版 次  | 2018年10月第1版 2018年10月第1次印刷                                                                                                                                                                                                                                                                       |
| 印 数  | 0001—2000册                                                                                                                                                                                                                                                                                      |
| 定 价  | 48.00元                                                                                                                                                                                                                                                                                          |

凡购买我社图书,如有缺页、倒页、脱页的,本社营销中心负责调换

版权所有·侵权必究

# 前 言

实物表面的三维数字化技术被广泛应用到数字娱乐、虚拟现实、文物保护和数字博物馆等领域，是计算机视觉的重要研究内容。方便、快捷地实现对物体表面密集的三维信息获取是实物表面的三维数字化技术的发展趋势。条纹投射的结构光三维信息获取技术是一种先进的非接触光学测量方法。应用于动态场景的结构光三维信息获取技术的研究是结构光技术的研究热点。

本书主要阐述了构建实时结构光系统所涉及到的原理和技术，同时吸收了国内外许多具有代表性的最新研究成果。全书取材新颖、内容丰富，注重理论与实际的结合。本书共 6 章：第 1 章主要介绍基于视觉三维形貌测量的背景、常用方法、发展趋势以及所面临的问题；第 2 章重点阐述实时编码光设计中所涉及的性能、设计方法、解码过程；第 3 章重点分析结构光系统建模，以及所对应的标定方法；第 4 章为结构光系统的误差传递分析；第 5 章介绍稀疏数据的实时多场景配准算法；第 6 章为实时结构光系统实验，通过实验验证以上的理论的可行性。

本书是国家自然科学基金项目（51609086）、河南省基础与前沿技术研究计划项目（142300410173）、郑州市科技攻关项目（141PPTGG372）的成果。参与编写的有课题组成员闫浩、张帆老师，在此表示感谢。

由于作者水平有限，书中难免存在不妥之处，恳请广大读者批评指正。

许 丽

2018 年 2 月

# 目 录

## 前言

|                                |    |
|--------------------------------|----|
| 第 1 章 绪论 .....                 | 1  |
| 1.1 基于视觉三维形貌测量的背景 .....        | 1  |
| 1.2 基于视觉三维形貌测量的常见方法 .....      | 2  |
| 1.2.1 被动式方法 .....              | 2  |
| 1.2.2 主动式方法 .....              | 4  |
| 1.3 结构光技术的发展趋势和技术难点 .....      | 10 |
| 1.3.1 结构光技术的发展趋势 .....         | 10 |
| 1.3.2 结构光技术的技术难点 .....         | 13 |
| 1.4 本书的内容安排 .....              | 14 |
| 参考文献 .....                     | 16 |
| 第 2 章 实时编码光设计 .....            | 26 |
| 2.1 引言 .....                   | 26 |
| 2.2 编码光性能分析 .....              | 27 |
| 2.2.1 实时编码光设计要求 .....          | 28 |
| 2.2.2 空间周期性准则 .....            | 30 |
| 2.2.3 灰度传递函数 .....             | 38 |
| 2.3 实时编码光设计 .....              | 42 |
| 2.3.1 周期时空编码光设计 .....          | 42 |
| 2.3.2 周期时空编码光与其他编码光的性能比对 ..... | 46 |
| 2.4 解码 .....                   | 48 |

|       |                  |     |
|-------|------------------|-----|
| 2.4.1 | 条纹边缘分割算法         | 48  |
| 2.4.2 | 解码算法             | 50  |
| 2.5   | 小结               | 52  |
|       | 参考文献             | 52  |
| 第 3 章 | 结构光系统标定方法的研究     | 55  |
| 3.1   | 结构光系统建模          | 55  |
| 3.1.1 | 成像模型             | 56  |
| 3.1.2 | 光平面模型            | 58  |
| 3.1.3 | 结构光系统测量模型        | 59  |
| 3.2   | 结构光系统的标定方法       | 60  |
| 3.2.1 | 基于平面靶标的光平面标定方法   | 61  |
| 3.2.2 | 标定过程鲁棒性分析        | 65  |
| 3.3   | 标定实验             | 69  |
| 3.4   | 小结               | 86  |
|       | 参考文献             | 86  |
| 第 4 章 | 结构光系统误差传递分析与结构优化 | 89  |
| 4.1   | 结构光系统误差传递分析      | 89  |
| 4.1.1 | 三维数据计算误差分析       | 90  |
| 4.1.2 | 光平面标定误差分析        | 92  |
| 4.1.3 | 标定点获取误差分析        | 93  |
| 4.2   | 结构光系统结构优化        | 97  |
| 4.3   | 小结               | 102 |
|       | 参考文献             | 103 |
| 第 5 章 | 稀疏数据的实时多场景配准     | 105 |
| 5.1   | 引言               | 105 |

|       |                     |     |
|-------|---------------------|-----|
| 5.2   | 稀疏点云数据 .....        | 106 |
| 5.3   | 传统的最近点迭代算法 .....    | 108 |
| 5.4   | 改进的最近点迭代算法 .....    | 111 |
| 5.4.1 | 搜索参数的选取 .....       | 111 |
| 5.4.2 | 搜索准则的确定 .....       | 116 |
| 5.4.3 | 初始估计 .....          | 121 |
| 5.4.4 | 重采样 .....           | 122 |
| 5.4.5 | 改进算法流程 .....        | 123 |
| 5.5   | 数据配准实验结果 .....      | 124 |
| 5.6   | 小结 .....            | 130 |
|       | 参考文献 .....          | 130 |
| 第 6 章 | 实时结构光实验系统 .....     | 133 |
| 6.1   | 实时结构光实验系统的构成 .....  | 133 |
| 6.1.1 | 系统硬件 .....          | 134 |
| 6.1.2 | 系统流程 .....          | 135 |
| 6.2   | 实验结果 .....          | 137 |
| 6.2.1 | 几何体三维形貌测量结果 .....   | 137 |
| 6.2.2 | 头像 1 三维形貌测量结果 ..... | 142 |
| 6.2.3 | 头像 2 三维形貌测量结果 ..... | 146 |
| 6.3   | 小结 .....            | 150 |

# 第 1 章 绪论

## 1.1 基于视觉三维形貌测量的背景

在机器视觉、机器人导航、仿生学、三维动画、工业领域的自动化生产等领域，常常需要获得实际物体或场景的表面三维形貌信息。正是这些实际生产生活中日益增长的需求，促使了三维形貌测量技术的诞生和发展。

基于视觉的三维形貌测量方法可无损且方便地实现对实际三维场景的数字描述<sup>[1]</sup>。这些方法是以现代光学为基础，集光电子学、计算机图像图形学、信号处理等科学技术为一体的现代三维形貌测量技术。计算机技术、数字图像处理等高新技术的发展，以及不断推陈出新的高性能微处理器（CPU），使得实时三维形貌测量成为可能；大容量存储器保证了大范围场景的三维信息的存储；数字图像传感设备（CCD、PSD 或 CMOS）分辨率的提高增大了系统的获取分辨率；基于 DMD/LCD 的数字投影仪的介入，使得所投影的编码光可以通过计算机编程更为灵活地进行选择。这些相关技术的进步不仅为三维形貌测量领域的技术创新提供了可能，更为其应用前景开拓了广阔的空间。

三维形貌测量技术的发展始于 20 世纪 60 年代后期<sup>[2-4]</sup>。近期“欧盟第六框架计划”的招标项目建议中就有十几个主题与此相关。国外斯坦福大学<sup>[5]</sup>、奥克兰大学<sup>[6]</sup>、麻省理工学院<sup>[7]</sup>、纽约大学（石溪分校）<sup>[8]</sup>等著名学府的实验



室,以及福特公司等大型制造企业所属的研究机构也在从事相关研究。国内四川大学<sup>[9]</sup>、清华大学<sup>[10]</sup>、天津大学<sup>[11]</sup>等多所大学中的研究小组亦在开展研究工作。动态场景、复杂面形的三维形貌测量,以及系统构成的便携性、高效性等问题已成为三维形貌测量技术研究的趋势。

## 1.2 基于视觉三维形貌测量的常见方法

三维形貌测量近年来取得了巨大的进步,根据应用背景和实现原理的不同,产生了相应的诸多方法。一般可分为主动式方法和被动式方法,前者需要借助特定光源参与物体表面三维信息的获取,而后者获取深度信息时则不需要辅助光源参与。被动测距法适合具有一定光学特征表面信息获取的应用场合;而主动三维形貌测量法可应用的领域相对广泛,具有三维形貌测量精度高、抗干扰性能好和实时性强等优点。

### 1.2.1 被动式方法

常见的被动式三维形貌测量技术有立体视觉、立体光度法、从 X 信息恢复出物体的形状(shape from X)等。

立体视觉是模仿人眼双目的视觉原理,通过立体图对恢复物体三维几何信息的方法<sup>[12]</sup>。该系统一般由两个摄像机构成,由双摄像机从不同角度同时获取周围景象的两幅图像,利用视差原理恢复出场景的三维几何信息。虽然立体视觉的几何关系是非常明确的,但在实际应用中仍然存在若干问题<sup>[13-15]</sup>:左右两幅图中的对应点有可能因为视觉信息的不充分(如强度或颜色无法区分)而无法匹配;由于遮掩或阴影的影响,景物中的某些部分有可能只出现在视图

对的一个观察点上；满足对应点匹配计算的候选点有可能出现假对应；对物体纹理特征的过分依赖性（丰富的纹理特征可以降低对应点匹配的多义性）等。

立体光度法（Photometric stereo）<sup>[16,17]</sup>是利用表面在不同光照条件下所拍摄的图像序列来重构这个表面的三维形状。该方法的基本思想是通过不同光源产生不同的图像辐射方程来增加方程数目，以求解表面法向量。通常固定摄像机和物体的位置，设置不同方向上的三个光源，依次照明得到同一视场下的三幅照片。每幅照片的亮度方程都提供了一个约束条件。在梯度空间，三个方程的亮度等值线的交点就确定了所在点的表面法矢取向。但它有一些不可避免的缺点：是逐点恢复法，对噪音敏感；所能恢复的区域必须是三个光源同时照射的，在预先不知形状的物体上，如何确定这个区域是一个难题；此外光度立体法的多光源方案，使光照图像法失去了设备配置简洁的优点。

根据视觉中的 X 信息恢复出物体的形状是被动式三维形貌测量技术的常用方法之一，其中 X 信息还包括物体表面的纹理、轮廓、运动等。

由纹理恢复形状方法（Shape from Texture）<sup>[18]</sup>是 Gibson 首先提出的。该方法根据纹理或纹理梯度来确定表面深度的变化。在平面性和一致性分布的假设下，纹理密度的梯度可以提供表面取向的信息。一个具有纹理梯度的图像往往表示表面深度方向逐渐减小的图像，可以用两个方向上的某些纹理特征的偏导数来描述纹理梯度。如由圆组成的纹理在倾斜的表面上呈现为椭圆，其长轴方向就确定了相对于摄像机的旋转，而短轴与长轴的比确定了倾斜度。如果物体表面没有纹理，或者纹理是杂乱无章的，那么这种方法就不能应用<sup>[19]</sup>。

由轮廓恢复形状（Shape from Silhouette）<sup>[20-22]</sup>是基于一个简单的事实：当从不同视点观察物体时，物体一定位于各视点的视锥体形成的公共交集里。这种算法简洁、无须对应点匹配，适用于快速重建。但对于复杂形状的全场景

恢复，不仅需要多视角图像的合成，还要利用有限轮廓的曲面拟合。

由运动恢复形状 (Shape from Motion) <sup>[23,24]</sup> 是在假设一个图像序列中的匹配问题已经得到解决的基础上实现的。目前，也有一些研究工作在尝试排除匹配问题，从运动中恢复形状。然而，运动分析需求解一组非线性方程，而解的收敛性又与初始值选取的好坏有关。要将由运动恢复形状这种方法成功运用于实际景物形状获取，必须解决初始条件的选择和避免奇异点这两个问题。

以上所介绍的被动式方法多可以实现具有一定光学特征物体表面的三维信息获得，无法实现对一些无特征的表面的三维形貌测量。

### 1.2.2 主动式方法

为了实现对无特征表面的对应区域匹配，在物体表面人为地加入不同的特征信息，从而实现表面的三维形貌测量。因此，主动三维获取系统主要由三个部分组成：投影系统、图像接收系统和信息解调系统。投影系统将光源投影到待测三维表面，三维表面对特定光源产生的时间或空间调制，由图像接收系统接收待测表面返回的光信号，再由信息处理系统处理接收到的光信号，获得待测表面的三维信息（见图 1-1）。即整个三维形貌测量过程可以看作是三维表面信息的调制、获取和解调的过程。

根据三维面形对光源调制方式的不同，主动三维形貌测量方法分为时间调制与空间调制两大类。飞行时间法是典型的时间调制方法，主要基于光脉冲在空间的飞行时间来确定物体的面形。空间调制方法是根据物体面形对光源的强度、相位等参数的影响来确定物体面形。它包括激光三角法、傅里叶变换轮廓术、相位测量轮廓术、编码结构光法等。

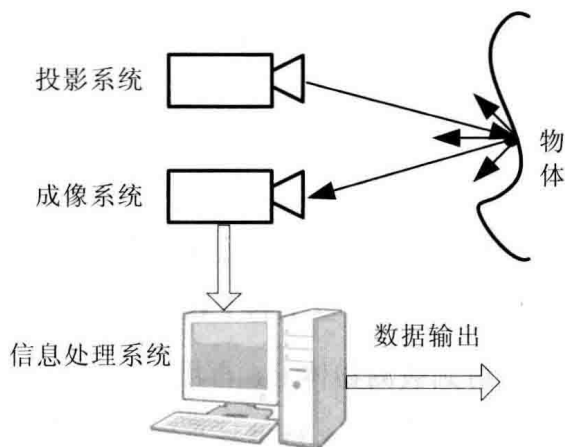


图 1-1 主动三维传感系统构成

Fig.1-1 Structure of active 3D acquisition system

## 1. 飞行时间法

飞行时间法 (Time of Flight, TOF)<sup>[25]</sup> 是利用光束传播时间来描述距离的长短。当一个激光脉冲信号从发射端发出, 经物体表面漫反射后, 沿几乎完全相同的路径反向传回到接收端, 检测光脉冲从发出到接收之间的时间延迟, 就可以计算出距离。如再增加相应的二维或者三维扫描装置, 使光束扫描整个物面, 就可以形成被测物体的三维面形数据。传统飞行时间法的分辨率约为 1mm。近年来, 单光子计数法、光全息技术等相关技术的应用, 使该方法的分辨率可以达到微米 ( $\mu\text{m}$ ) 数量级<sup>[26,27]</sup>。对于小尺寸场合的物体扫描, 这类方法最大的困难在于探测信号在时间上的精确获取。如果时间上存在一个很小的误差, 乘上光速后得到的距离误差就很大。因此该方法受限于装置中脉冲探测和时间获取设备精度, 并且获取速度慢, 不适合于动态场景的信息获取。

## 2. 莫尔轮廓术

自莫尔轮廓术 (Moire Profilometry) 出现以来<sup>[28]</sup>, 作为一种新的计量技术, 其包括阴影莫尔法、投影莫尔法、扫描莫尔法, 以及这些方法的改进方法。最

早提出的阴影莫尔法是利用面光源照明,在物体表面形成阴影光栅,阴影光栅受到物体表面高度的调制发生变形。如果从另一个方向透过基准光栅观察物体,基准光栅与变形的阴影光栅形成莫尔条纹。通过对莫尔条纹的分析获得被测表面的三维信息。这种方法的局限性在于被测物体前必须放置基准光栅,由于制造面积较大的光栅很困难,所以不利于获取大尺寸物体表面的三维信息。投影莫尔法是将光栅投射到被测物体上,再用第二个光栅观察物体表面的变形光栅像,得到莫尔条纹,对莫尔条纹进行分析就可以得到物体的深度信息。该方法具有较大的灵活性,适合于获取较大物体表面的三维信息。在阴影莫尔法、投影莫尔法中,仅仅从莫尔等高线上并不能判断表面的凹凸,不适于自动三维形貌测量。为了提高图像获取速度和便于用相移方法分析条纹图,可以用两个或多个 CCD 同时获取具有不同相移的莫尔条纹,从中检测出物体的原貌<sup>[11, 29, 30]</sup>。

### 3. 相位测量轮廓术

相位测量轮廓术(Phase Measuerment Profilometry, PMP)的基本思想就是通过有一定相位差的多幅条纹图来计算相位,再对应计算出物体的高度分布<sup>[9, 10, 31-33]</sup>。当一块正弦光栅被投影到三维漫反射物体表面上时,成像系统获得的由物体高度调制的变形光栅像为

$$I(x, y) = A(x, y)\{1 + B(x, y)\cos[\phi(x, y)]\} \quad (1-1)$$

式中:  $A(x, y)$  是物体表面上不均匀反射率;  $B(x, y)$  是条纹的对比度; 相位函数  $\phi(x, y)$  描述了直条纹受到被测物体表面高度调制而引起的变形状况。虽然相位函数是  $x$  的非线性函数,但是因为参考平面上每一点相对于参考点的相位值都是唯一的和单调变化的,所以可以通过一个基准平面的实测确定平面坐标和相位分布之间的映射关系。

式(1-1)中有 $\phi(x, y)$ 、 $A(x, y)$ 和 $B(x, y)$ 三个未知量,需获取3帧以上条纹图才能求解 $\phi(x, y)$ 。因此,一般采用相移技术(Phase Shifting Technique),即把投影光栅在一个周期内均匀移动 $N$ ( $N \geq 3$ )次,每次移动 $2\pi/N$ 相位,利用这 $N$ 帧图像就可以计算出 $\phi(x, y)$ <sup>[34,35]</sup>。因此相位测量轮廓术不适合动态场景的测量。

#### 4. 傅里叶变换轮廓术

1983年M.Takdea等人将傅里叶变换用于物体三维面形的测量,提出了傅里叶变换轮廓术(Fourier Transform Profilometry, FTP)<sup>[36,37]</sup>。该方法是将快速傅里叶变换用于结构光场三维面形测量。通过投影系统将罗奇光栅或正弦光栅投影到被测物体表面,摄像系统获取被测物体高度分布调制的变形条纹,并由图像采集系统将变形条纹图送入计算机进行快速傅里叶变换、滤波和逆傅里叶变换,求解出物体的高度分布信息。

同相位测量轮廓术相比,它只需要一帧变形条纹图就可以恢复被测物体的三维面形,适合于动态场景的测量<sup>[38-42]</sup>。但在相同条件下,傅里叶变换轮廓术的测量精度不如PMP的测量精度高。频谱混叠、散斑噪声、条纹不连续、频率滤波窗的选择等因素会影响傅里叶变换轮廓术的测量精度<sup>[43-48]</sup>。因此,傅里叶变换轮廓术很难实现对复杂物体表面的信息获取。

#### 5. 激光三角法

激光三角法<sup>[49-51]</sup>(Laser Triangulation)以传统的三角测量为基础,激光束沿投影光轴投射到物体表面,在另一方向,光场被探测器CCD接受。已知系统光路的几何参数,以及从测量得到的成像光点位置参数就能计算出被测物体的高度分布。激光三角法的典型原理结构如图1-2所示。

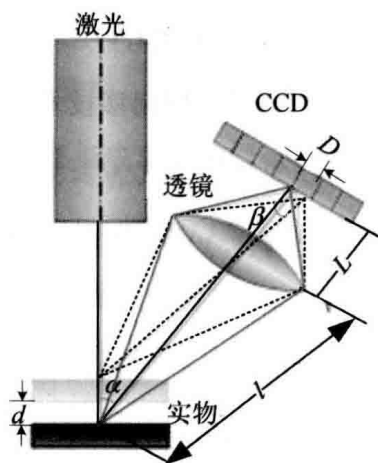


图 1-2 激光三角测距原理

Fig.1-2 Principle of laser triangulation

从光源发出的光束，经照明光学系统聚焦到被测表面，在其表面上形成光强均匀的光点。其中一部分被表面散射的光通过接收透镜成像，由放置在透镜焦面上的光电传感器接收并进行检测。经过计算表明：成像光点在检测器上的位置是探头和被测表面之间距离的函数。当被测表面接近或离开探头时，成像光点在检测器上的横向位置将随之变化。通过检测探测器上光点成像的位移，可以测定物体表面的距离变化。三角测量装置的探测器表面垂直于会聚透镜的光轴，假如物体表面的位移量  $d$  很小，照明系统光轴与接收系统光轴的夹角  $\alpha$  不变，那么激光三角测量装置中探测器测得的位移量  $D$  与  $d$  的关系是

$$D = \frac{L \sin \alpha}{l \sin \beta} d = T d \frac{\sin \alpha}{\sin \beta} \quad (1-2)$$

式中： $l$  和  $L$  分别为接收系统的物距和像距； $T = l/L$  为接收透镜的放大率。由式 (1-2) 可知，当  $T$ 、 $\alpha$ 、 $\beta$  为定值的情况下， $D$  与  $d$  成线性关系。

事实上，大多数三维面形测量仪器都派生于该三角测量原理。

## 6. 编码结构光法

结构光法是使用具有某种模式的主动光源来代替立体视觉中的一个摄像机，向场景中投射该光源，然后从图像上提取相对应的模式，使得匹配问题容易解决。结构光法自1970年出现以后经历了从点到线再到面的发展过程<sup>[52, 53]</sup>。编码结构光法（Coded Structured Light）则被认为是传统的结构光技术革命性的进步。该系统通过高效编码光实现高效的数据获取。典型的编码结构光原理如图1-3所示。

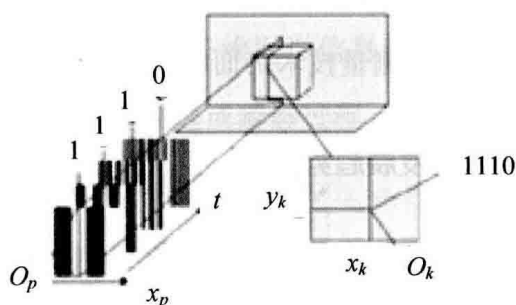


图 1-3 编码结构光原理

Fig.1-3 Principle of coded structured light

编码光使用一种特定的编码方式，使得图像平面上的被编码像素具有唯一的编码值。编码值一般是由数字构成，通常借助图像上一些可视性的特性来表示，如灰度、颜色、几何等。与一般的编码方法相同，需要编码的点越多，所需要的编码值就越大，编码方式的设计和解码过程就越难。根据编码光设计不同，编码结构光测量方法可以分为空间编码、时间编码和直接编码。空间编码是利用其周围点的信息来确定唯一的编码值<sup>[54-57]</sup>；时间编码是在连续时间上获得一个图像序列，从图像序列上获得唯一的编码值<sup>[58]</sup>；直接编码是借助一些特殊的特征（如颜色和灰阶）得到编码值<sup>[59-62]</sup>。为了适应各种应用背景，



出现了使用多种编码策略的混合编码方式,如时空编码<sup>[63-65]</sup>是对时间编码和空间编码的折中、伪随机序列和颜色相结合的编码方式<sup>[66,67]</sup>等。

## 1.3 结构光技术的发展趋势和技术难点

随着计算机、光学元器件和激光器性能的提高,三维传感技术已在实用性和商业性的应用中取得了突破性的进展。但是根据实际应用领域的不断扩展,高速、高精度、复杂面形的三维形貌测量仍旧是目前光学三维形貌测量领域的研究重点,结构光三维形貌测量技术仍面临许多挑战性的课题。

### 1.3.1 结构光技术的发展趋势

结构光三维形貌测量技术本身具有非接触、测量速度快、测量精度高、易于在计算机控制下实现自动化信息获取等优点,同时又由于 DMD/LCD 数字投影仪的使用,使得所投影的编码光可以通过计算机编程更为灵活地进行选择,可以最大限度地提高信息获取精度和获取速度。这些优点和辅助手段将促使动态过程的密集三维信息的获取,成为结构光技术的发展趋势之一。系统误差的可控性研究和系统构成的便携性研究可以使结构光技术在实际应用中更为便捷和广泛。

#### (1) 动态场景三维形貌测量。

长期以来,由于三维传感原理、硬件性能和三维传感算法的制约,三维传感技术很难做到实时测量,但是近年来随着高速摄影技术和计算机的飞速发展,为动态场景的实时三维形貌测量提供了可能<sup>[68-70]</sup>。因此,在动态场景的实时三维形貌测量中,针对不同系统的实时算法研究成了该领域的关键。

此为试读,需要完整PDF请访问: [www.ertongbook.com](http://www.ertongbook.com)