

# 结构光成像技术概述

李子奥<sup>1)</sup>

<sup>1)</sup>(华中科技大学, 人工智能与自动化学院)

**摘 要** 由于三维信息比二维信息更加真实直观, 如何高效采集三维信息是非常重要的一个研究方向。结构光技术作为一种结构简单, 操作方便的基于计算的 3D 成像技术, 具有巨大的发展前景。目前在结构光领域已有广泛的理论与实际应用。本文扼要介绍了结构光的成像原理、结构光的研究现状与应用与结构光的未来发展方向。

**关键词** 结构光

## A Brief Introduction to Structure Light

Li ZiAo<sup>1)</sup>

<sup>1)</sup>(School of Artificial Intelligence and Automation, Huazhong University of Science and Technology)

**Abstract** Since Three-dimensional information is more real and intuitive than two-dimensional information, how to effectively acquire three-dimensional information is a very important topic. As a computationally-based 3D imaging technology with simple structure and convenient operation, structured light technology has great development prospects. Currently there have been extensive theoretical research and practical applications in the field of structured light. In this paper, we briefly introduce the imaging principle of structured light, the research status and application of structured light, and the future development direction of structured light.

**Key words** Structured Light

## 1 引言

自 1948 年 Gabor 发明全息术以来, 全息术经历了不断发展的阶段, 如: 离轴全息、反射全息、彩虹全息、计算全息、模压全息<sup>[1]</sup>。结构光三维成像技术是一种利用辅助的结构光照明获取物体三维像的技术, 它采用的技术方案是投影一个载频条纹到被成像的物体表面, 利用成像设备从另一个角度记录受被成像物体高度调制的变形条纹图像, 再从获取的变形条纹图中数字解调重建出被测物体的三维数字像。如今, 数字化技术的发展使得基于结构光的三维成像与三维显示技术愈发完善, 使结构光成为全息术中重要的一环。

现有对结构光的研究主要分为两个方面。一是理论研究, 对结构光成像的数学模型以及不同种类结构光的成像效果进行研究<sup>[2,3]</sup>; 而是应用研究, 将结构光应用到不同实际场合中去, 解决现实生活中存在的问题, 如棉花幼苗形态特征测量<sup>[4]</sup>、键盘帽平整程度检测<sup>[5]</sup>、散装堆料体积测量<sup>[6]</sup>等等。除

此之外, 也有研究尝试将结构光方法与其他方法相融合<sup>[7]</sup>。

本文概括性地介绍了结构光领域: 第2章详细介绍了结构光的成像原理; 第3介绍了结构光的研究现状与应用场景, 并以牛肉嫩度检测为例介绍结构光的真实应用; 第4章探讨了结构光未来的研究方向。

## 2 成像原理

如图1中左图所示, 结构光传感器主要由两部分组成, 一为光源发生系统(光源), 二为成像装置。光源发出光线照射到待测量物体表面后, 经反射被成像装置所感知, 计算机通过成像结果进行分析与计算得到成像装置与待测物体之间的距离。

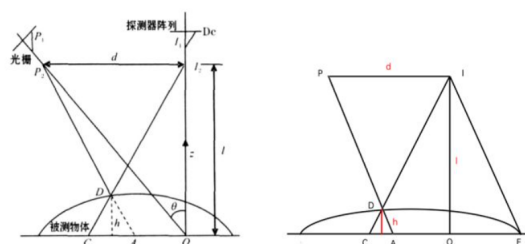


图1 装置示意图与几何光路图

李子奥,  
班级: 自动化 1903 班  
学号: U201914629  
E-mail: leeziao0331@hust.edu.cn

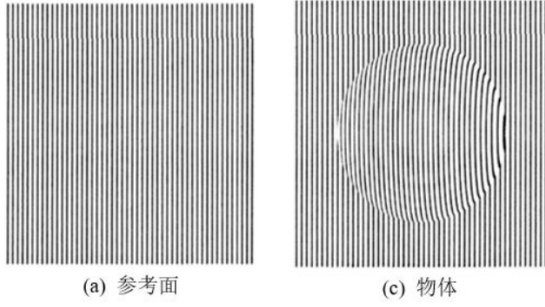


图2 参考面条纹图与物体反射条纹图

图1中左图的结构光成像物理模型可以化为图1右图所示的几何模型。

### 2.1 相位与高度的关系

光源从  $A$  点发出光线并照射至待测物体表面的  $D$  点, 光线在  $D$  点处反射至成像装置  $I$  点。当待测物体不存在时, 光路  $ID$  延申至平面上  $C$  点, 即相机在没有物体存在时会观察  $C$  点处的图像; 加入待测物体后, 光路  $PD$  延申至平面上  $A$  点, 即相机观测到的条纹本应该投射至平面上  $A$  点。于是, 因为待测物体的存在, 相机成像产生了偏移距离  $AC$ 。将距离  $AC$  换算成相位差  $\Delta\phi$  的形式, 得到:

$$\Delta\phi = 2\pi \cdot \frac{AC}{T} \quad (1)$$

其中  $T$  为平面上条纹的周期。依几何关系,  $\triangle ACD$  相似于  $\triangle ECI$ , 因此待测点高度  $h$  与距离偏差  $AC$  的关系为:

$$\frac{h}{l} = \frac{AC}{CE} = \frac{AC}{AC + d} \quad (2)$$

当  $AC \ll d$  时, 公式2可化简为:

$$\frac{h}{l} = \frac{AC}{d} \quad (3)$$

联立公式1和公式3, 得到相位差  $\Delta\phi$  和距离  $AC$  的关系为:

$$\Delta\phi = \frac{2\pi}{T} \cdot h \cdot \frac{d}{l} \quad (4)$$

### 2.2 光强与相位的关系

图2展示了成像装置在两种不同状态下成像结果。图2中参考面条纹图表示当待测物体不存在时, 成像装置感知到的图像; 物体反射条纹图表示当待测物体被置于参考面上时, 成像装置感知到的图像。从两张图的对比中能够看出: 加入物体后, 原先垂直的光纹线发生了扭曲, 下文将推到成像扭曲与物体深度的关系。

当光栅中射出的条纹光线为正弦波时, 参考面条纹图的光强为:

$$I_0(x, y) = A(x, y) + B(x, y) \cos \phi(x, y) \quad (5)$$

其中  $A$  是背景光强度,  $B$  是调制深度 (光栅强度)。不考虑反射比, 物体反射条纹图的光强为:

$$I_r(x, y) = A(x, y) + B(x, y) \cos \phi_r(x, y) \quad (6)$$

参考面条纹图光强  $I_0$  与物体反射条纹图光强  $I_r$  之差就是相位差, 根据公式4, 相位差  $\Delta\phi$  是物体高度  $h$  的函数, 因此:

$$\cos \phi_r(x, y) - \cos \phi(x, y) = \Delta\phi = k \cdot h(x, y) \quad (7)$$

其中, 系数  $k = (2\pi \cdot d)/(T \cdot l)$ 。将相位差  $\Delta\phi$  代入至公式6中, 物体反射条纹图的光强可以化为:

$$\begin{aligned} I_r(x, y) &= A(x, y) + B(x, y) \cos [\phi(x, y) + \Delta\phi] \\ &= A(x, y) + B(x, y) \cos [\phi(x, y) + k \cdot h] \end{aligned} \quad (8)$$

### 2.3 相位的获取

参考面条纹图方程5含有  $A$ ,  $B$ ,  $\phi$  共三个未知变量, 因此求解时至少需要联立三个方程。四部移相法通过移动光源的初始相位, 从而获得多个方程。例如, 当投影条纹图时, 拍摄4张照片, 每张照片之间条纹移动  $\pi/2$  的相位, 能够得到:

$$\begin{aligned} I_1 &= A + B \cos(\phi) \\ I_2 &= A + B \cos(\phi + \pi/2) \\ I_3 &= A + B \cos(\phi + \pi) \\ I_4 &= A + B \cos(\phi + 3\pi/2) \end{aligned} \quad (9)$$

联立上述四式, 解得相位  $\phi$ :

$$\phi = \arctan \left( \frac{I_4 - I_2}{I_1 - I_3} \right) \quad (10)$$

### 2.4 相位解包裹

公式10通过  $\arctan$  解出相位  $\phi$ , 然而,  $\arctan$  的输出相位阈值在  $-0.5\pi$  到  $0.5\pi$  之间, 这会导致输出相位的不连续。为了从相位函数中计算处待测物体的真实高度, 需要解决反三角函数运算引起的截断问题, 即将截断相位恢复成原有的相位分布。这一过程被称为**相位解包裹**, 是结构光三维传感中最重要的一步。

图3显示了一连续上升待测物体相位解包裹前后的相位值。可以看出, 使用反三角函数  $\arctan$  解出的相位存在断裂点, 这是因为真实的相位情况应该位于负无穷到正无穷正无穷之间, 而反三角函数的会将整个实数空间截断为  $-0.5\pi$  到  $0.5\pi$ 。以真实相位为  $0.6\pi$  为例, 因为  $0.6\pi$  超出了  $0.5\pi$  的阈值上

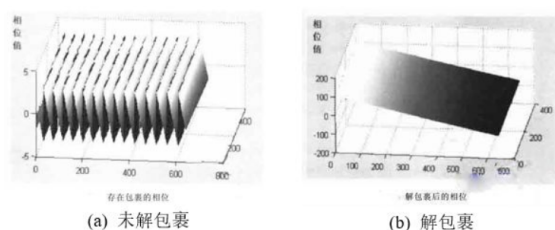


图3 相位解包裹前后相位值

线，解出的截断相位输出为  $-0.4\pi$ ，造成了大小为  $\pi$  偏差。

相位解包裹的基本思想是待测物体的深度变化是连续的，而相位截断会带来显著的误差（在上例中为  $\pi$ ）。利用这一特性，如果相邻两个像素的相位之差的绝对值大于一临界值，则认为两像素之间发生了截断，其相位需要通过解包裹恢复。

实际上，虽然  $\phi$  是从公式10中解出的，而  $\arctan$  的值域为  $[-0.5\pi, 0.5\pi]$ ，但由于  $I_4 - I_2$  与  $I_1 - I_3$  的极性已知， $\phi$  真实的截断值域为  $[-\pi, \pi]$ 。相位解包裹的算法为：比较相邻两个点的相位值，若其差值小于  $-2\pi \times H$ ，则后一点的相位值应当加上  $2\pi$ ；若其差值大于  $2\pi \times H$ ，则后一点的相位应当减去  $2\pi$ 。其中  $H$  为阈值门限，且  $H \in [0, 1]$ 。

## 2.5 物体轮廓还原

将解包裹得到的真实相位  $\pi$  带入公式4中，还原出真实物体高度。

## 3 研究现状与应用

由于结构光成像技术能够保存物体的三维空间（包括三维形貌、灰度、颜色信息），并在重建过程中可以完整的恢复物体的三维特征<sup>[1]</sup>，结构光技术具有重要的科学价值。

结构光三维成像技术是一种利用辅助的结构光照明获取物体三维像的技术，它采用的技术方案是投影一个载频条纹到被成像的物体表面，利用成像设备从另一个角度记录受被成像物体高度调制的变形条纹图像，再从获取的变形条纹图中数字解调重建出被测物体的三维数字像。结构光三维成像过程是两步成像过程，先获取物体被结构光条纹调制的二维图像（调制加光学成像），然后从包含变形条纹的二维像中通过数字重建方法得到物体的三维数字像。结构光成像是条纹图像的信息处理过程，类似于干涉测量中的干涉条纹的处理<sup>[1]</sup>。

结构光三维成像的过程包含数字重建的步骤，并以物体的三维空间信息作为输出，其早期的目的

不是三维显示，而是三维测量，因此早期的结构光工作更多地涉及到三维测量和信息处理<sup>[8]</sup>。由于结构光的三维面测量技术具有非接触、测量速度快、精度高和易于在计算机控制下实行自动化测量等优点，结构光技术已被都会让你图研究并被广泛应用于各个领域，包括钢轨成像<sup>[7]</sup>，键盘帽平整度检测<sup>[5]</sup>，堆料体积测量<sup>[6]</sup>，幼苗形态检测<sup>[4]</sup>。

### 3.1 牛肉嫩度检测

牛肉是人们日常生活中的重要肉品，牛肉嫩度是评价牛肉品质的重要指标。传统牛肉嫩度检测方法为感官评价法和剪切力测试法。感官评价法由专业评审员根据个人经验，借助视觉和味觉对肉的品质特性进行评价；剪切力法是把牛肉加热到一定温度再用刀具切断，根据切断力来判断肉的嫩度。这两种传统方法都有操作繁琐、效率较低的缺点。卢伟等通过结构光成像与点云分割等图像处理算法解决以上问题，大幅度提高检测速度并简化操作流程，使牛肉嫩度检测操作从抽样检测级别提升到实时检测级别。另外，该方法能够达到 97.5% 以上的准确率。

卢伟等首先利用脉冲气流对牛肉表面进行冲击，在冲击时同时通过结构光成像技术获取待测牛肉表面凹陷区域的三维点云信息；然后采用去噪等点云处理方法获得牛肉表面凹陷区域的深度、体积等特征。最后，一个广义回归神经网络（CRNN）利用这些特征预测牛肉的嫩度。

### 3.2 键帽平整度检测

键盘帽是电脑的重要配件，键帽平整度则是评价键盘质量的重要指标，其好坏直接影响到使用者的舒适度与顺畅度。传统键帽平整度检测方法在检测速度上存在缺陷，无法实现高速的在线检测。谭立春通过结构光成像与骨架算法相结合实现了高速、高精度的平整度检测方法。

## 4 未来发展

现代生产的发展对几何量测量提出了越来越高的要求：及要求有高的测量准确度，还要求有快的测量速度和较低的使用条件。在这种条件下，结构光传感器成为了优秀的解决方案。结构光发放具有结构简单、使用方便、抗干扰、与被测物体不接触等特点，在对有腐蚀性物体、高温物体等不允许直接接触的物体的测量中显示出了明显的优势，因而也在化工等领域得到了广泛的应用。随着

应用与研究的深入, 结构光方法也在不断地改善与完善。

### 4.1 易用性

结构光传感器的研究集中于激光三角法传感器, 即直接探测投射在物体上的光点, 其特点在于结构简单, 信号处理量小, 但在用于位移测量时要求物体沿光线方向移动, 在用于三维测量时需要两个方向的扫描, 结构较为复杂<sup>[2]</sup>。部分研究工作<sup>[2]</sup>针对这一现象提出了解决方法, 如使用线测量的方法。

### 4.2 高精度

结构光测量系统的标定精度直接决定三维测量的精度。针对目前结构光标定存在的计算过程复杂、精度低等问题, 王华等<sup>[2]</sup>提出了一种空间高精度线结构光直接标定法。他们设计异形标定块, 通过 DBSCAN 算法剔除标定块线激光条纹上的噪声点与边界点, 然后利用改进的 PSO 算法优化最短路径寻优的目标函数, 提取线激光条纹上的特征标定点, 建立像素坐标与世界坐标之间的映射关系表, 获取待标定点的世界坐标。

### 4.3 结构光类型

由于基于三角测量的 3D 表面成像系统中存在的固有视差, 并且存在因遮挡而在采集的图像中丢失条纹的可能性, 观测条纹的顺序不一定与投影条纹的顺序相同<sup>[10]</sup>。因此, 选择一种鲁棒的结构光类型十分重要。论文<sup>[3]</sup>对高斯结构光、HG 结构光、LG 结构光等结构光进行分析与对比, 并提出未来结构光发展的方向。

## 5 结论

结构光三维成像技术是一种基于计算的数字三维成像技术, 与传统的全息三维成像技术具有原理上的区别。近年来, 结构光三维成像技术得到了快速的发展并被应用到了各种场景中。在未来, 随着数字处理技术及其相关器件与设备的发展, 结构光技术在理论研究和实际应用中仍有巨大的发展空间。

## 参考文献

- [1] 苏显渝, 张启灿, 陈文静. 结构光三维成像技术[J]. 2014, 41(02): 9-18.
- [2] 王华, 郭于龙, 张爽, 等. 优化的 PSO 空间高精度线结构光直接

- 标定法[J/OL]. 应用激光, 2021, 41(04):860-868[2022-05-19]. DOI: 10.14128/j.cnki.al.20214104.860.
- [3] FORBES A, DE OLIVEIRA M, DENNIS M R. Structured light[J/OL]. Nature Photonics, 2021, 15(4):253-262[2022-05-16]. DOI: 10.1038/s41566-021-00780-4.
- [4] 李曜辰. 基于结构光成像的棉花幼苗形态特征测量研究[EB/OL]. 华中农业大学, 2019[2022-05-19]. DOI: 10.27158/d.cnki.ghznu.2019.000643.
- [5] 谭立春. 基于结构光成像的键盘键帽平整度检测方法研究[EB/OL]. 湖南大学, 2019[2022-05-19]. DOI: 10.27135/d.cnki.ghudu.2019.003419.
- [6] 李红卫. 基于结构光成像的散状堆料体积测量系统研究[Z]. [出版地不详]: 西安科技大学, 2019.
- [7] 王. 基于偏振融合的钢轨廓形线结构光成像方法[J]. 光学学报, 2020, 40(22):88-96.
- [8] 苏显渝, 李继陶. 信息光学[M]. [出版地不详]: 信息光学, 1999.
- [9] 卢伟, 胡庆迎, 代德建, 等. 基于气流脉冲和结构光成像的牛肉嫩度检测方法[J]. 农业机械学报, 2020, 51(12):324-331.
- [10] GENG J. Structured-light 3D surface imaging: A tutorial[J/OL]. Advances in Optics and Photonics, 2011, 3(2):128[2022-05-16]. DOI: 10.1364/AOP.3.000128.