

# 非接触式三维重建测量方法综述

丁少闻<sup>1,2</sup>, 张小虎<sup>1,2</sup>, 于起峰<sup>1,2</sup>, 杨 夏<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>国防科学技术大学航天科学与工程学院, 湖南 长沙 410073;

<sup>2</sup>国防科学技术大学图像测量与视觉导航湖南省重点实验室, 湖南 长沙 410073

**摘要** 三维重建是目前发展最迅速、应用最广泛的技术之一。从广义角度出发,任何获取目标三维信息的手段都可被称为三维重建。利用三维重建数据可对目标的三维参数进行测量。目前基于三维重建的测量方法众多,由于接触式测量存在诸多问题,如何依据不同的实际需求和条件选择合适的非接触式测量方法,是获得所需三维测量数据的关键。从原理分析出发,对各种非接触式重建测量方法进行系统分类。在实际测量任务中可依据精度需求、环境约束、参数种类、成本控制等因素选择合适的非接触式三维重建测量方法。

**关键词** 图像处理; 广义三维重建; 非接触式三维重建测量

**中图分类号** TN911.74 **文献标识码** A

**doi:** 10.3788/LOP54.070003

## Overview of Non-Contact 3D Reconstruction Measurement Methods

Ding Shaowen<sup>1,2</sup>, Zhang Xiaohu<sup>1,2</sup>, Yu Qifeng<sup>1,2</sup>, Yang Xia<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> College of Aerospace Science and Engineering, National University of Defense Technology, Changsha, Hunan 410073, China;

<sup>2</sup> Hunan Provincial Key Laboratory of Image Measurement and Vision Navigation, National University of Defense Technology, Changsha, Hunan 410073, China

**Abstract** Three-dimensional (3D) reconstruction is one of the most rapidly developing and widely used technologies. From a broad perspective, any method of obtaining the object's 3D information can be called the 3D reconstruction. The 3D reconstruction data can be used to measure the 3D parameters of the target. There are many methods of measurement based on 3D reconstruction at present. Because of the problems in the contact measurement, how to choose the appropriate non-contact measurement method according to the different requirements and conditions is the key to obtain the required 3D data. Based on the principle analysis, a systematic classification of non-contact reconstruction measurement is given in this paper. The appropriate method of non-contact measurement based on 3D reconstruction can be chosen in the task of actual measurement according to the precision demand, environmental constraints, parameter types, cost control and other factors.

**Key words** image processing; generalized three-dimensional reconstruction; non-contact three-dimensional reconstruction measurement

**OCIS codes** 100.3010; 200.4740; 200.3050; 200.4560

## 1 引言

通常人们所接触的世界是三维的,相比距离、角度等一维、二维数据对世界的管窥蠡测,三维数据更贴近于实际,可以更完整地描述待测物体。目前,三维数据已广泛应用于测量、虚拟现实等多种领域,是认识环境、感知世界的重要工具。

三维数据需要通过三维重建技术获得。广义三维重建是指通过测量工具与解算方法,获取目标局部位

**收稿日期:** 2016-11-25; **收到修改稿日期:** 2017-02-19

**作者简介:** 丁少闻(1989—),男,博士研究生,主要从事图像测量与视觉重建方面的研究。E-mail: dswen0611@126.com

**导师简介:** 张小虎(1973—),男,研究员,博士生导师,主要从事图像测量、运动目标检测与跟踪方面的研究。

E-mail: zxh1302@gmail.com

三维坐标、面三维结构乃至整体三维模型;狭义三维重建指通过重建技术,获取包括结构、纹理、尺度等的目标完整三维信息,其是广义三维重建的最高形式。

获取三维数据后,对目标进行各类测量是其最重要的应用之一,即三维重建测量。大型工件的尺寸参数、结构信息,地形的高程信息等,都可通过三维数据获取。相比利用传统测量工具和方法对这些待测信息逐一进行测量,通过重建获取目标三维数据,再根据实际需要解算、提取所需信息要更加便捷与可靠。

通过测量工具探头接触表面获取目标三维结构,是最直观最容易实现的三维重建测量方法。典型的接触式三维重建测量工具是三坐标测量机<sup>[1]</sup>。将其一个结构测量探针安装在三自由度乃至更多自由度的伺服装置上,驱动探针沿各个方向移动,当探针碰到物体表面时,通过比较该触碰点与基准点间的机械移动量,就可以获取这一点的空间位置。控制探针在物体表面移动,即可获得目标表面结构。

接触式测量的优点是测量精度高,适合精密测量小型工件三维结构参数。三坐标测量机目前仍然是工厂的标准立体测量装备,高精度三坐标测量机的精度可以达到纳米级<sup>[2]</sup>。但接触式测量也存在以下各种缺点:受测量工具和待测目标形状制约,测量区域有限,难以测量大尺寸和特殊形状工件,同时需要补偿测头半径带来的误差;需接触待测目标,易划伤表面;测量速度慢,效率低;测量非刚体可能因接触使表面变形,导致测量数据不准。

由于接触式测量存在上述问题,随着技术的进步和工程实际需求的牵引,基于各种技术原理的非接触式三维重建测量方法不断出现和发展,满足了各类测量需求<sup>[3-4]</sup>。非接触式三维重建测量是指在不接触待测目标的前提下,获得目标三维空间结构并进行测量的方法。结合待测目标结构特征、测量环境、精度要求、成本控制等多种因素,选择合适的方法进行重建与测量是解决实际问题的难点与关键。因此,覆盖方法全面、分类系统合理的综述性文献对于非接触式三维重建测量方法的选择具有重要的指导意义。本文将从原理分析出发,对目前主流的非接触式三维重建测量技术进行全面归纳和比较,分析各类方法分别适用的测量场合和影响精度的因素,并给出提高精度的方法和研究方向,以达到为不同的工程测量需求提供建议的目的。

根据测量信号源的不同,非接触式测量可以分为主动式和被动式两种情况。主动式测量通过向被测物体发射可控制信号并接收和分析返回信号,计算被测物体表面各点相对信号源的空间位置进而完成测量。被动式测量则不主动发出测量信号,利用环境光源直接拍摄待测物体图像,通过图像分析获得目标表面三维数据。下面分别对两类测量方法中的不同类型依次进行介绍、分析和比较。

## 2 主动式测量

主动式测量是指向待测目标发射可控制信号,通过发射信号与返回信号的分析比较,获得待测场景或物体表面各点的深度信息,进而利用获得的三维信息进行建模和测量。发射的可控制信号可以是可见光、激光,甚至电磁波、声波等。同种信号源也有多种测量方法,从方法原理出发,可将主动式测量分为基于激光测距、基于结构光和基于干涉信号等类型。以上几类方法是最常用的主动式三维重建测量类型,其信号源大多为激光或可见光,此外还有通过发射和接收电磁波成像、利用超声波成像、利用物体对 X 射线吸收的计算机断层扫描(CT)等特殊信号测量方法。

### 2.1 基于激光测距测量法

在进行深度信息测量时,最直观且易实现的方法就是激光测距,结合伺服系统,即可实现待测场景或物体的三维表面重建与测量。使用激光作为主动光源是因为相比其他信号源,激光光源强度更高,可收束可调制,便于测距。常用的激光测距方法有激光对焦法、飞行时间法(TOF)、相位调制法。

#### 2.1.1 激光对焦法

激光对焦法由信号发射器将激光束打向被测物体表面,当激光束在表面移动时,通过控制与信号发生器固连的伺服装置,使激光束在待测物体表面始终保持同一收束(聚焦)状态,从而保证激光发射器与物面激光点始终保持同一距离,由伺服装置位移量即可计算获得物体表面起伏信息。Akuta 等<sup>[5]</sup>研制的一种基于激光对焦法的三维形状测量系统,在 500 mm 范围内测量精度可达 $\pm 4 \mu\text{m}$ 。

激光对焦法测量系统出现时间较早,其是对传统接触式三坐标测量机的一种改进。由其原理可知,其测量的是深度变化信息,可以理解为将测量头更换为激光聚焦头的三坐标测量机,以此避免可能接触目标的问

题。正因如此,如何控制激光在物面移动时保持同一收束状态是激光对焦法的研究关键点。

该方法测量耗时较长,同时受伺服装置活动范围限制,不适合进行场景三维重建,但在局部表面重建与精细测量上,具有很高的精度,因此适合解决小型结构如文物、机械部件等的三维数据高精度测量的问题。

### 2.1.2 飞行时间法

飞行时间法是一种原理简单、应用非常广泛的深度测量方法<sup>[6]</sup>。由于光的传播速度恒定,获取传播时间即可计算得到传播距离。飞行时间法基本原理如图 1 所示,信号发射单元向被测物体发射激光脉冲,经表面反射后被测量系统的传感器接收,计算激光脉冲发射与接收的时间间隔,即可获得物体表面相对信号发射单元的深度信息。

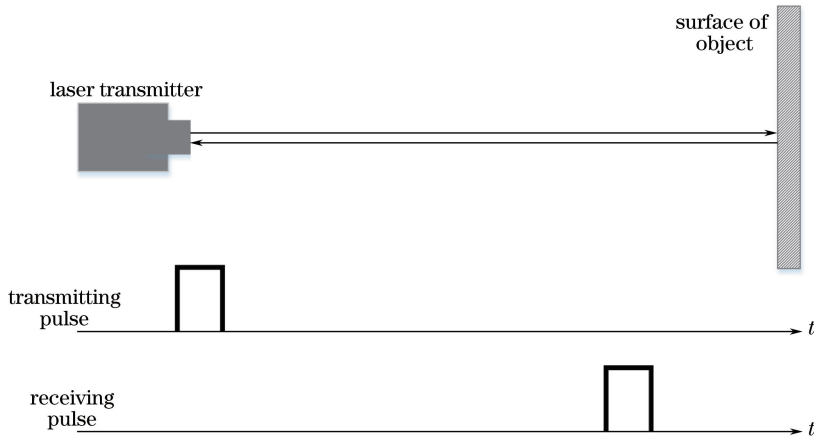


图 1 飞行时间法原理示意图

Fig. 1 Sketch map of TOF

飞行时间法的主要优点是不需要图像处理环节,处理速度快,可实现实时测量;其原理简单,测量系统稳定可靠。同时,相比三坐标测量机,其具备更大的测量范围,一般在 5~10 m 左右。德国 Basler 公司生产的飞行时间法工业相机,有效测量范围可达 13 m,其只需一次拍摄,即可获得待测物体或场景的三维数据,但精度只能达到 1 cm。由于测量范围大,飞行时间法适用于场景重建测量与环境感知,基于飞行时间法的深度信息传感器已大量投产并广泛应用于多个领域。以主流飞行时间法传感器厂商为例,MESA 主要面向科研用途;PMD 的飞行时间法传感器在户内、户外均能使用,适用于科研、工业等各种场合;而 Optrima、微软的相机主要面向娱乐应用,目前常见的第二代 Kinect 相机使用的即为飞行时间法技术。鉴于飞行时间法在深度测量上的实时稳健特性,目前其已成为无人机避障领域的核心技术之一,即通过飞行时间法建立障碍物表面三维形貌并测量相对距离,制定相应的避障策略。代表性的有零度公司在国际消费类电子产品展览会(CES)2016 上发布的无人机 xplorer 2,采用的便是飞行时间法测距方案。

飞行时间法的缺点在于系统易受环境光源影响,在室外使用需要更高的改进成本,同时分辨率比较低,最优在毫米级。可以看出,时间间隔的测量是该方法测量精度的主要决定因素,改进起止脉冲的识别及优化信号接收通道的带宽参数可以提高飞行时间法的精度<sup>[7]</sup>。

### 2.1.3 相位调制法

相位调制法<sup>[8]</sup>是对飞行时间法在提高测量精度方面的一种改进。其测量系统原理与飞行时间法类似,但在测距过程中结合了相位检测。激光束幅度被正弦调制,通过比较发射光束和接收光束之间的相位可计算出雷达与目标之间的距离。若激光束只使用一个频率,则当相位差超过  $2\pi$  时,测量结果存在多解性,因此为保证有效的测量范围,相位调制法在实际测距中采用多个调制频率。

相比于飞行时间法,相位调制法要复杂一些,但其有效地减少了带宽提高了精度,适合构建小范围高精度的三维测量系统,连续测量精度可达纳米级<sup>[9]</sup>。其主要问题是抗环境干扰能力差,因此若要提高测量系统精度,需对信噪比与频漂进行控制,在如何选择合适调制频率以及接收功率等方向上继续展开研究。

基于激光测距的三维重建测量方法原理简单,方法稳健,测量系统成本较低,在三维重建测量领域占有一席之地,主要面向的是待测空间点数量不多的测量任务。但其都是单点连续测量,在不降低测量精度的前

提下提高测量效率难度较大。随着结构光三维重建的不断发展,高效的全场三维主动测量成为可能。

## 2.2 基于结构光测量法

结构光法是一种基于三角测量技术<sup>[10]</sup>的三维结构测量法。结构光系统如图 2 所示,其采用了外界人为、指定分布的照明光,在物体表面形成光场,结合三角测距原理将光场信息解算为深度信息,从而获得物体表面三维结构。

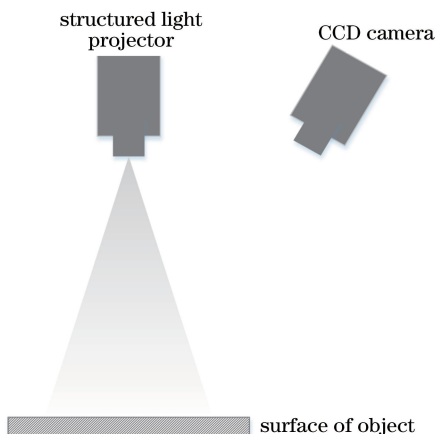


图 2 结构光系统

Fig. 2 System of structured light

结构光法依据实现原理可以分为直接三角法和光栅相位法。直接三角法单纯利用三角测量原理计算空间点深度,而光栅相位法虽然在计算深度时同样使用三角法,但其核心在于光场相位的解算。

### 2.2.1 直接三角法

直接三角法基本原理是:由结构光投射器向待测物体表面投射可控制的光结构形成特征点,由电荷耦合器件(CCD)摄像机对物面进行拍摄,标定得到投射器及相机的位置、姿态等参数,利用三角测量原理交会计算特征点深度信息。

三角测量原理如图 3 所示,相机坐标系  $O$ -XYZ 的  $Y$  轴垂直纸面向内,向待测物面表面某点  $P$  方向投射光线,投射角可以通过外参数标定获取,像点位置  $p$  在图像上提取,结合相机内参数标定结果,即可交会获得  $P$  在相机坐标系下的三维坐标。

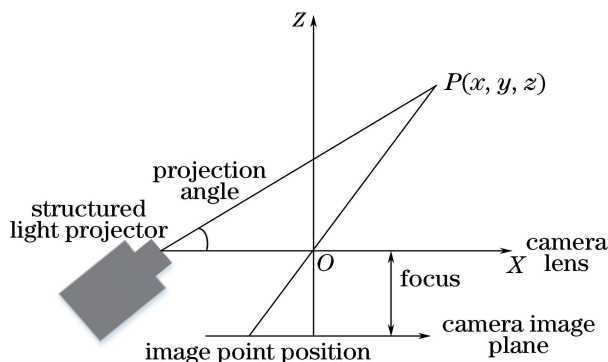


图 3 三角法原理示意图

Fig. 3 Sketch map of triangle method

直接三角法运算量小,测量系统便携,成本低,便于安装和维护,被广泛应用于工业级三维测量中。但是该方法测量精度受特征提取精度的约束,测量精度与速度难以同时得到提高;与所有光学非接触三维测量一样,存在遮挡问题;同时,受环境光源影响较大,一些形态的结构光的光强随测量距离的增大迅速衰减。

根据结构光形态,可将直接三角法分为光点式、光条式、光面式<sup>[11]</sup>。

#### 1) 光点式

光点式结构光法是由结构光投射器在物体表面投射一个光点,结合 CCD 相机或者其他光敏器件测出该

光点深度信息。若需要整个物面的表面信息,再分别沿水平和垂直方向进行逐点扫描。

光点式结构光法原理简单,常用的是单点单三角式。该方法精度可达毫米以内,有效测量范围 1 m 左右。测量精度主要受结构光投射器及相机标定精度和提点精度的约束。若增加相机(多三角式)或改进特征提取方法,精度可以进一步提高,测量范围也可扩大。Yoshida 等<sup>[12]</sup>研制的激光测距系统,由单激光束投射器和偶数个相机组成,在 5 m 测量范围内,测量相对误差为 2%。郭红卫等<sup>[11]</sup>采用单点双三角式,在 1700 mm×1200 mm×200 mm 的范围内,测量精度优于 1 mm。Bakos 建立的光点式结构光扫描测量系统,结合轮廓法进行特征提取,500 mm 内测量精度为±0.1 mm<sup>[11]</sup>。

各类结构光法都会受到环境光干扰,但由于光点式结构光法原理简单,因此相比而言在应对环境光干扰时,具备更大的改进空间和更多的应对策略。Shinichi Tamura 在标定激光投射器和相机时,引入电流计和迭代搜索法,并对误差模型进行分析,其搭建的光点式测量系统,在户外也可正常进行测量,在 1 m 范围内,相对误差小于 2%<sup>[12]</sup>。

若利用光点式结构光法进行单点测量,可具备实时性,如机器人手眼激光测距。若需要测面结构信息,则计算量随待扫描表面积的增加而急剧增加,造成扫描时间过长,因此,在进行大范围物面重建与测量时,可以采用更高效的结构光形式,如光条式和光面式。

### 2) 光条式

光条式结构光法又称为光切法,其基本原理也是三角测量法。使用的结构光源为线光源,沿光条垂线方向移动从而对待测物面进行扫描,相比光点式结构光法,扫描维度降为一维,减少了拍摄图像数量和处理时间。

准确提取光条中心线是确保光条式结构光法精度的关键,需要根据实际成像环境,选择合适的增强、平滑、滤波、分割等图像处理方法,制定快速、精确的中心线定位策略。为了在图像上提出完整的光条中心线,断线修补是必须考虑的一个环节。此外,标定精度、线匹配策略、多次扫描后的点云配准与拼接也是影响测量精度的重要因素<sup>[13]</sup>。常规的光条式结构光法的精度与光点式在一个量级,Tsugito Maruyama 在改进光条匹配方法基础上设计的多光条测量系统,在 100 mm 范围内精度优于 0.2 mm,500 mm 范围内测量精度优于 1 mm。Araki 等<sup>[14]</sup>利用转镜移动光条进行扫描,其测量系统 600 mm 范围内相对误差为±0.3%。刘斌等<sup>[15]</sup>建立了适用的直接线性变换(DLT)改进数学模型,研制了基于线结构光的微小直径高精度测量系统,测量精度可达±1.6 μm。光条式结构光法还被应用于机器人视觉引导定位,以线结构光自动扫描的方式,获取目标对象在相机坐标系下的三维位姿以实现定位,其定位精度、灵活性和稳定性均可满足目前工业现场的应用要求<sup>[16-17]</sup>。

### 3) 光面式

虽然光条式结构光法提高了表面重建效率,但依然还需要扫描这一过程,为进一步提高效率,引入面结构光。光面式结构光法又称为编码图样投影法,其对同一片待测区域投射面结构光,只需一次采图,在投射器和相机标定基础上,进行面结构光的匹配和利用三角测量法进行深度信息解算。常见的面结构光有光栅式、网格格式等编码形式。

面结构光法执行效率高,适合小型物体的快速三维建模与测量,如人脸的三维信息采集。其精度同样由标定精度、匹配精度等因素制约。相比其他两种直接三角法结构光测量,光面式结构光更加复杂,匹配难度更大,提高特征定位精度和匹配正确率,是该方法的主要发展方向。Yee 等<sup>[18]</sup>对结构光编码方式进行改进,使其具备容错机能,测量系统平均误差为 0.488 mm。Commean 等<sup>[19]</sup>等采用圆环编码光,引入多视传感器,对头像模型进行环拍测量,在 330 mm 范围内的测量精度优于 0.25 mm。Ito 等<sup>[20]</sup>提出了编码光面三层检测模式,并对标定方法进行了改进,在 800 mm 范围内相对测量误差为 0.2%。

#### 2.2.2 光栅相位法

直接三角法系统稳定测量结果可靠,但测量范围小不适合做全场测量。若需进行全场测量可使用光栅相位法。光栅相位法又称为相位三维测量轮廓术<sup>[21-27]</sup>,其也使用了光栅作为投影结构光,但与直接三角法中的光面式结构光法不同的是,其并不是通过特征提取、匹配和三角测量获得表面深度信息,而是由投射到被测物体表面的条纹图像解调出包含深度信息的相位变化场,进而根据相位与物面深度的关系求解物面深度分布。根据相位检测方法的不同,可以将光栅相位法分为叠栅法、移相法、变换法。

## 1) 叠栅法

叠栅法出现时间较早,其使光源透过基准光栅  $X$  照射在待测物体表面,形成由物面调制的像栅,再在观察点处透过光栅  $Y$  获取像栅与光栅  $Y$  的叠加条纹,即叠栅图样。若光源点  $S$  与观察点  $R$  的连线与光栅平行,则叠栅图样上每一条纹  $N_i$  对应的深度  $h_i$  都可计算求得,由此即可获得物体的等高线图,进而推算得到物体表面轮廓信息。如果  $X$  和  $Y$  为同一块光栅,则称之为照射型叠栅法,其原理如图 4 所示。

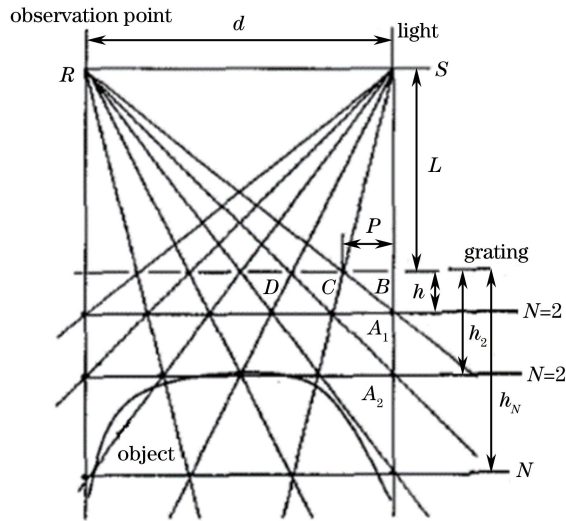


图 4 照射型叠栅法示意图

Fig. 4 Sketch map of irradiation Moire method

照射型叠栅法原理简单,但由于投射光栅  $X$  和观察光栅  $Y$  为同一块光栅,测量范围受光栅大小约束,因此该方法不适合大尺寸物体的测量,为此引入投影型叠栅法。其差别在于在观察点处使用另一块光栅,这样便增大了测量范围。以上两种传统叠栅法的缺点是只能测量整数级相位,为此又由投影叠栅法衍生出扫描叠栅法,其在观察点侧用计算机生成的虚拟栅像替换了观察光栅,使之和物面调制的像栅相迭加。其优点是可以很方便地调节光栅栅距、相位等,提高了测量精度。

叠栅法装置简单,可全场在线检测,尤其适合光滑表面物体的形貌测量,在工业形貌和人体轮廓测量上应用广泛,其精度与直接三角法相当<sup>[28]</sup>。但由于观测中滤除了高频成分,叠栅法灵敏度较低,分辨率和精度受物体表面倾斜度、反射率变化以及阴影等的影响,不适合进行高精度测量。如果需要重建出物面局部精细结构,而测量时间充裕允许拍摄多幅图像,则在同样粗细光栅条件下,可采用移相法。

## 2) 移相法

移相法是通过分析不同位置的物面光栅条纹图像,进行相位解调进而获得各点深度信息。如果是在移动光栅过程中采集所需图像,则称为时域移相法,又称为时域相位测量轮廓术,如图 5 所示。

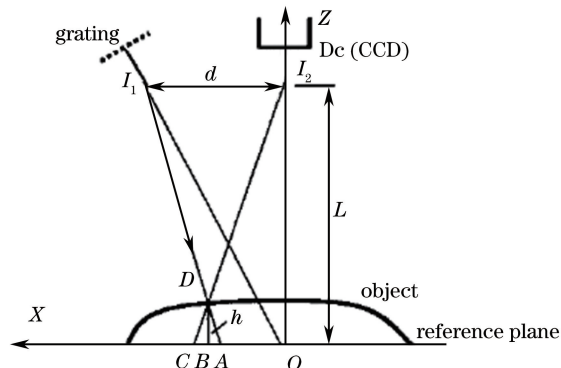


图 5 时域移相法示意图

Fig. 5 Sketch map of time domain phase measurement profilometry

测量系统使用正弦光栅,其在待测物面上的光栅条纹光强可表示为:

$$I(x, y) = R(x, y) \{A(x, y) + B(x, y) \cdot \cos[\Phi(x, y)]\}, \quad (1)$$

式中  $A(x, y)$  代表背景强度,  $B(x, y)/A(x, y)$  指条纹对比度。  $R(x, y)$  是物体表面各点反射率。相位函数  $\Phi(x, y)$  描述的是由物面调制的光栅条纹形变。通过控制机构使投影光栅按其周期的  $1/N$  间隔做横向移动,采集  $N$  张变形光栅像(称为  $N$  步时域移相法),进而解算深度信息。

时域移相法运算量少,灵敏度高,是光栅相位法中最有效、最可靠的一种,其精度通常优于  $0.1 \text{ mm}$ <sup>[29]</sup>,德国 ATOS 公司开发的 Triple Scan 工业级高解析度 3D 扫描测量仪的精度更可达到  $0.01 \text{ mm}$ 。但是,其需要对光栅进行精密移动,增加了系统的复杂性。同时由于时域移相法需要在不同时刻采集多张条纹图像,因此不适合动态测量。鉴于此,空域移相法被提出。空域移相法又称为空域相位测量轮廓术,其结构布局与时域移相法相同,但只用一幅条纹图来解调相位信息。其原理是采用两个窗函数直接卷积原图,从而将一幅条纹图拆为  $N$  幅,再采用时域移相法公式计算相位。这种方法能近似达到时域移相法的效果,但要求正弦栅像具有高载频,原图条纹的幅值、相位以及背景变换要缓慢。即使如此,其分辨率仍较低,与相同条件下的  $N$  步时域移相法相比,分辨率相差  $N$  倍。

### 3) 变换法

随着数字滤波技术的不断发展,基于傅里叶变换、小波变换等数字滤波工具的变换法也逐渐成为光栅相位法中的重要一支。其基本测量结构与时域移相法相同,根据数字滤波内核的不同可分为傅里叶变换轮廓法(FTP)法<sup>[30]</sup>和小波变换轮廓法(WTP)法<sup>[31]</sup>。

傅里叶变换轮廓法的基本原理是通过对光栅投影条纹图像进行傅里叶变换、滤波,将高频载波和低频的物面信息在频域进行分离,然后再通过傅里叶逆变换,提取包含深度信息的相位,近似于在频域进行操作的叠栅法。傅里叶变换轮廓法也只需要采集一幅条纹图即可得到相位值,测量相对误差在  $1\%$  左右<sup>[32]</sup>。其存在的问题是计算量大,使用傅里叶变换将引入额外误差;同时滤波器参数的优化也增加了该方法的实现难度。

当待测物面结构比较复杂时,傅里叶变换轮廓法误差较大<sup>[33]</sup>,为此引入小波变换轮廓法对原始图像进行多级小波分解,将原始图像和被测物体背景图像相减后再对图像进行上述的频域处理。小波变换轮廓法提高了物面可测梯度阈值,提高了解相精度的稳定性,扩大了变换法结构光测量的应用范围。

以上几种光栅相位法,主要存在的实现难点有两个。其一是光栅本身精细度问题,若使用传统实物光栅,所得重建结果分辨率受到光栅条纹密度约束,而使用电子光栅,即使用相干波干涉条纹作为投影光,则对系统机械移动机构的精度以及稳定性要求很高。其二是叠相还原,即精确解算相位分布求取对应深度,常用的方法有利用不同时刻多张相位图实现叠相还原的时域叠相法,以及神经网络法、模拟退火法等抗噪声叠相还原法。

和直接三角法相比,虽同为结构光法,光栅相位法的优势在于可满足全场测量的需要,重建和测量精度更高,执行速度更快。但其更适合测量具有光滑表面的物体,在待测物面存在断点、阴影等情况时,光栅相位法会因条纹图像不连续而产生较大误差,因而需要更复杂的解决策略,如对光栅条纹进行编码<sup>[34]</sup>。而直接三角法原理简单,系统更加稳定可靠,也不需要引入复杂的条纹分析即可计算出待测物面深度信息,即使物面存在断点和阴影,也不会影响重建与测量。

结构光法是主动式非接触测量中最重要也是最常用的一类方法,测量结果可靠,精度高,被广泛应用于工件尺寸测量中。但结构光发射器离目标过远时光强衰减明显,且易受大气扰动和环境光照的影响,若要克服各种问题,取得高精度的测量结果,将使测量系统变得十分复杂,对系统机械精度和稳定性提出很高要求,而这些都会大大增加测量成本。

## 2.3 基于信号干涉测量法

信号干涉测量法利用由物面调制的相干信号源生成干涉条纹,待测物面深度信息包含在条纹的相位信息中,结合移相、外差等技术可对物体表面进行高精度重建与测量。根据信号源不同,可将信号干涉测量法分为可见光干涉法和散斑干涉法<sup>[8]</sup>。

### 2.3.1 可见光干涉法

可见光干涉法<sup>[35]</sup>的光学系统类似迈克耳孙干涉仪,如图 6 所示,其以双光束干涉技术为基础,通过特定

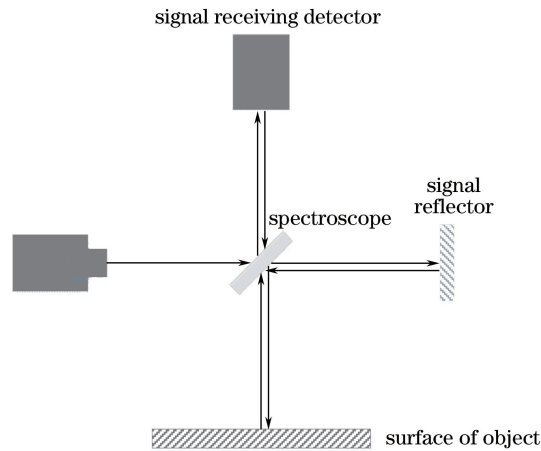


图 6 可见光干涉测量示意图

Fig. 6 Sketch map of visible light interferometry

扫描方式改变待测物体表面或参考镜位置,获得表面各点光强变化的离散数据,再依据可见光干涉特征提取各点对应的最佳干涉位置,即定位零光程差位置,从而获得各点深度信息。

可见光干涉测量对光源要求很低,但需要精细稳定的机械扫描机构。其测量精度非常高,分辨率最优可达纳米量级,提高测量精度的途径是提高条纹对比度以及最佳干涉位置的识别精度。可见光干涉测量范围非常小,一般的测量量程在几十微米,主要应用于表面三维微观形貌高精密度测量,便于工程零件等的制造质量评价。美国 WYKO 和 ZYGO 公司利用这一技术生产的可见光干涉测量仪在这一领域最为知名,其量程可达毫米级。

### 2.3.2 散斑干涉法

当激光照射在物面上时发生漫反射,会出现明暗散布的斑点,称为激光散斑。研究发现散斑场具有确定的相位信息和可测的光强,并随物面变形而变化,散斑干涉法是通过对比变化前后的散斑图像,高精度地测量物面起伏变化信息。其与计算机技术及数字图像处理技术相结合,形成电子散斑干涉测量技术(ESPI)<sup>[36]</sup>,ESPI 与相移技术相结合可有效地对物面深度变化信息进行计算。在信号源端布置三个不共面且不同波长的激光束,形成三路散斑干涉条纹,从而将 ESPI 引入三维<sup>[37]</sup>。

散斑干涉法可以达到很高的分辨率,能实现全场测量,目前普遍用于机械结构如轴承等在发生形变时的三维位移场精密测量,结合相移法测量精度理论可达到  $1/100$  波长(10 nm 级)。但散斑干涉条纹图像中存在着很强的随机噪声,极大影响了条纹可见度和分辨率,制约了测量精度,同时受信号源约束,散斑干涉法难以测量热变形<sup>[38]</sup>。在实际测量过程中,需要研究对干涉条纹图像的滤波去噪处理方法以及条纹高精度自动提取方法,并对相移算法进行优化<sup>[39]</sup>。

除以上几种主动式三维重建测量类型外,还有电磁波成像、超声波成像、CT 等特殊成像测量方式,其有专门的工业和医疗应用背景<sup>[40]</sup>,因此不再细述。

主动式测量对环境光源没有依赖,可以根据待测对象、环境、成本等因素有针对性地选择测量方法和工具,测量精度最高可达纳米级别。但是,主动式测量方法需要专门的信号发生装置及控制装置,测量系统相对复杂,测量成本高,同时还要分析主动信号在传播过程中受环境影响而产生的误差。在希望减少测量成本同时对测量精度没有过高要求的情况下,可以考虑被动式测量的方法。

## 3 被动式测量

被动式测量<sup>[41]</sup>指通过摄影测量方法,重建目标表面三维结构并进行测量。如果是通过单一视角图像结合其他已知信息推算目标三维结构,称为单目视觉法;若通过不同视角所采集的同一时刻图像进行密集匹配和立体视觉交会,计算待测物面各点三维空间点坐标进而获得物体三维模型并进行测量,则称为立体视觉法。



### 3.1 基于单一视角测量法

单目视觉法只需布置一台角度合适的相机即可重建获得待测目标的三维模型<sup>[42]</sup>,该类方法重建过程简单,速度快,投入少,但重建精度不高,或需要大量已知信息支撑算法。

#### 3.1.1 焦距法

焦距法是单目视觉法的一类主要方法,可分为对焦法和离焦法两类。与激光对焦法类似,单目视觉对焦法通过相机调焦,使摄像机相对被测物点处于聚焦位置,根据透镜成像公式来计算被测点深度。对焦法原理简单,结构没有激光对焦法复杂,但精度不高,在厘米量级<sup>[43]</sup>,同时受镜头焦深和景深的限制。寻求精确的聚焦位置是对焦法的关键,且不同区域需要多次聚焦以获取多幅图像,因而测量速度慢。

若要在对焦法原理基础上提高测量效率,实现全场测量,可以采用离焦法,在拍摄单张图像后,根据事先标定的离焦模型计算图像上各被测点深度。姚成文等<sup>[44]</sup>基于离焦成像测量理论,结合改进象限插值法和矢径投影算法,实现了对液态环境中微球三维位置的快速精密测量,测量分辨率可达 1 nm。离焦法避免了为寻求精确的聚焦位置而降低测量效率的问题,其实现难点在于离焦模型的精确标定。

#### 3.1.2 单视角图像法

除焦距法外,还有很多其他通过单目相机获取目标三维信息的方法,其主要思想是先通过单张数码影像提取目标的轮廓、纹理、共面性等二维、三维几何信息,再利用少量已知条件获取该目标的空间三维信息。具体方法有边界提取法、纹理识别法、明暗法、立体光学法等<sup>[42]</sup>。

在实际重建过程中,如果待重建对象是一些简单形状组合而成的物体,如矩形、圆和柱形等,则可利用边缘法,通过边缘提取算法提取物体的边界信息,结合物体的尺度不变性和仿射不变性,还原图像中目标的三维结构;纹理识别法是依赖于人类心理因素对纹理的感知,结合物体表面纹理的梯度、扭曲、二阶矩和平面方向等信息对物体进行识别,估测其三维结构信息。

以上两种方法是在先验信息基础上,对目标三维结构、空间位姿进行粗略感知。利用单一视角图像若想获得具有测量意义的目标三维点云数据,可采用立体光学法。

立体光学法由明暗法衍生而来。明暗法又称为阴影恢复形状(SFS)法,在物体表面反射系数已知的前提下,把单张图像各点对应的亮度值代入预先设计的色度模型中,结合表面可微分性、曲率约束和光滑度约束等,求解各点深度信息。受单张图像信息量的限制,明暗法难以提高重建精度,因此可采用改变照明条件获取多张图像进行处理的方式来改善重建效果,即立体光学法。

立体光学法又称为光度立体法<sup>[45]</sup>,在相机位置不动、场景不变的情况下改变光源条件(改变光源方向或者采用不同颜色光源),获得待测物体的多张图像,根据二维成像原理,固定光源和光源辐照度,建立场景表面形状信息和二维图像信息间的关系,通过图像处理得到物体表面的梯度向量,再经过向量场的积分得到三维模型。

光度立体法是近些年三维重建测量领域研究和应用的重点之一。光度立体法在工业上用于金属板件的微小缺陷在线测量,可检测出直径 0.1 mm 的微小孔洞<sup>[46]</sup>。该方法在医学上可用于人体组织如舌模型等的三维信息采集,相对误差约为 7%<sup>[47]</sup>。在拍摄视角受限的情况下,光度立体法是一种比较好的三维重建测量的选择。

传统光度立体法要求光源为平行光,即采用远光源模型,但在现实中若目标尺寸较大或距离光源较近,则难以满足平行光假设。因此目前研究热点之一是如何使用近光源模型对目标进行精确重建。张珊珊等<sup>[48]</sup>对近光源条件下的成像模型进行分析,提出了一种近光源光度立体法解决思路,经验证相对误差为 9%。此外,将主动式重建测量方法与光度立体法相结合,也是光度立体法研究和应用的重要方向。主动式测量可以获得待测物表面深度信息粗值,从而直接对物面法向信息进行估计,免去了光度立体法中确定光源信息的复杂步骤,而在优化过程中结合光度立体法构造包含深度信息、法向信息和光滑性约束的代价函数,可有效抗噪,使重建结果更为平滑,同时包含更多表面细节信息<sup>[49]</sup>。

若需要在被动光源情况下,对目标进行高精度重建与测量,可以采用多目视觉测量方法。

### 3.2 基于不同视角测量法

多目视觉测量是指从不同角度获取图像,根据视差恢复待测物面的三维信息,其基本原理是双目交会测量。

### 3.2.1 双目交会法

双目交会测量使用两台相机从不同角度对待测目标进行拍摄,在相机内、外参数标定基础上,通过对匹配点对进行空间立体交会,获得目标点云,进而进行相关测量。目前图像匹配方法发展成熟,因此双目交会对材质、颜色等物面性质及背景光等环境因素要求较低,适合对大型三维物体如建筑物等的测量。双目交会测量精度主要受匹配精度、基高比、相机标定精度等因素制约,因此测量精度较低,同时难以实现实时测量,重建与测量范围不能覆盖整个待测物体,目前只有在一些特定场合得到应用。

### 3.2.2 多视图重建法

多视图三维重建测量法具体实现方法众多,其基本思路如图 7 所示,即从多个视角拍摄图像覆盖整个待测目标,通过图像间的匹配关系(匹配点对可以是特征点对,也可以是人工标志点对)对各图像对应相机的位置姿态进行解算,同时在空间交会、相机外参数优化过程中可以获得匹配点对应的空间点位置,即完成稀疏点云重建,再由密集匹配方法获得待测目标表面密集点云,通过尺度恢复使重建点云具有测量意义,进而进行目标表面三维信息测量。如果要获取目标的指定点间距离、位置姿态等信息,则只需利用稀疏点云即可完成测量。如果需要获取表面整体信息,则需对密集点云进行处理。

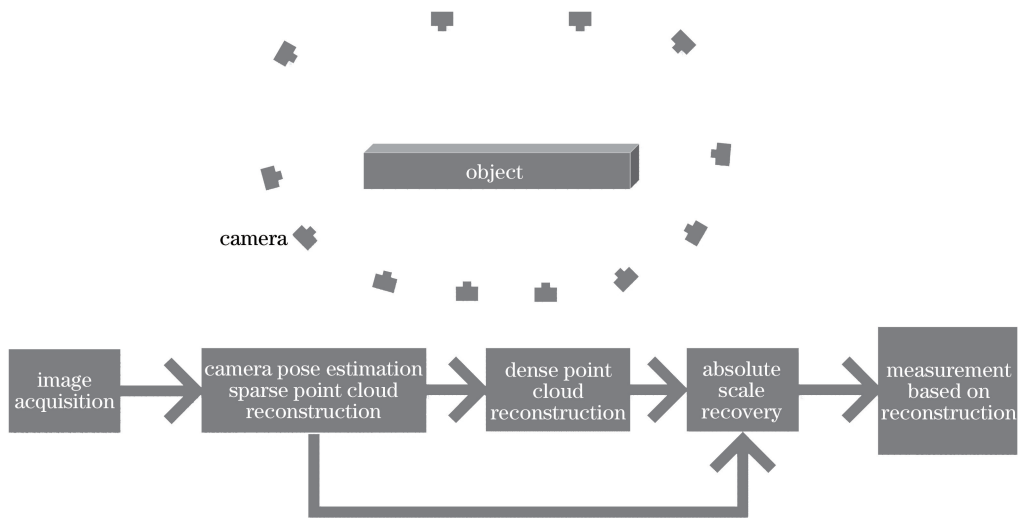


图 7 多视图三维重建测量法示意图

Fig. 7 Sketch map of multi-view 3D reconstruction measurement

目前已经较为成熟的多视图重建方法有运动结构恢复(SFM)<sup>[50-51]</sup>、Mve<sup>[52]</sup>等方法。这些方法只需要对待测目标拍摄一系列相互重叠的无序图像即可重建出目标三维结构。其中 SFM 算法的核心思想是利用光束法平差,对每幅图像对应相机的各项参数以及空间点云位置进行优化。直接通过 SFM 计算获得的是目标稀疏点云,需要结合 CMVS-PMVS 才可得到目标密集点云,早期集成 SFM 方法进行目标三维模型重建的软件是 Bundler,而后出现的 OpenMVG,也是一款开源的 SFM 软件,它在某些方面要优于 Bundler。Mve 也是一种利用多张任意拍摄的照片重建场景三维模型的方法,它与 SFM 在基本流程上相同,在具体实现细节上各有差异。就总体效果而言,SFM 更加稳健,Mve 重建点云更加精细。

多视图测量方法适用于机械部件、工艺品、文物等小型物件的三维模型精密重建,同时也可用于楼房、街道、桥梁等大范围场景重建与测量。其测量精度主要受相机标定以及定向精度、图像匹配精度以及优化策略的约束<sup>[53-54]</sup>。为保证匹配精度,要求待测目标和场景纹理尽量丰富。由于多视图重建在大范围目标测量中存在误差传递累积的情况,通常采用相对误差对其算法精度进行描述,目前主流多视图重建测量方法相对误差可达到 1/10000,甚至更小。Soheilian 等<sup>[55]</sup>利用多视图重建方法对城市街道和路面进行重建和测量,评估精度在厘米量级;Drizdal 等<sup>[56]</sup>在临床医学中对待手术患处进行多视图重建测量,精度可达 0.25 mm。

除上述方法外,轮廓法<sup>[57]</sup>也是多视图重建测量方法的一种,在完成相机精定向后,不进行密集匹配,而是提取物体各个侧面的轮廓线图形,再通过各角度轮廓的反投影重建三维影像。物体的一些细节信息,比如表面的细小凹洞,在投影重建过程中会消失,影响重建的效果。这种方法适用于测量表面比较光滑的结构。

以上多视图测量方法对于大型结构和小型物件都有较好的测量效果,同时成本在同等精度水平测量方法中相对低廉。主要问题存在于计算量相比双目交会测量更加巨大,无法进行实时测量,且对目标表面纹理或边缘清晰度要求较高,待测物体重建结果表面可能会出现孔洞和误重建点等情况,影响测量结果。

## 4 总 结

从原理出发,对目前主流的非接触式三维重建测量方法进行了系统分类,分析了影响精度的因素和提高精度的方法,并给出了各类方法的适用范围、各自优势以及研究方向,简要归纳对比如下。

激光对焦法的模式是单点测量,适用的场合是小型物体(机械部件、文物等)三维尺寸测量,存在的问题是聚焦状态不完全相同时会带来误差,精度量级为  $10\ \mu\text{m}$ ,研究的方向是高精度保持同一收束状态方法。

飞行时间法的模式是单点测量,适用的场合是场景快速重建测量、无人机实时避障,存在的问题是易受环境光源影响、激光飞行时间间隔难测准,精度量级为  $1\ \text{cm}$ ,研究的方向是改进起止脉冲的识别及优化信号接收通道的带宽参数。

相位调制法的模式是单点测量,适用的场合是小范围高精度测量,存在的问题是抗环境干扰能力差、测量范围小,精度量级为  $1\ \text{nm}$ ,研究的方向是控制信噪比与频漂、选择合适调制频率以及接收功率。

光点式三角法的模式是单点测量,适用的场合是小范围内场景及物体测量,存在的问题是测点效率低、范围小、精度低,精度量级为  $0.1\sim 1\ \text{mm}$ ,研究的方向是增加相机(多三角式)或改进特征提取方法。

光条式三角法的模式是线式扫描,适用的场合是小范围内场景及物体三维建模及测量,存在的问题是光条中心线提取及点云拼接不准会带来测量误差,精度量级为  $1\ \mu\text{m}\sim 0.1\ \text{mm}$ ,研究的方向是快速、精确的中心线定位策略以及点云配准与拼接方法。

光面式三角法的模式是全场测量,适用的场合是小范围内场景及物体快速三维建模及测量,存在的问题是结构光复杂、匹配难度大,精度量级为  $0.1\ \text{mm}$ ,研究方向是改进编码光及检测方式、提高特征定位精度和匹配正确率。

光栅相位法的模式是全场测量,适用的场合是工业形貌和人体轮廓快速精确测量,尤其适合测量光滑物体表面,存在的问题是难以获取精密光栅、制约了精度的提高,精度量级为  $0.01\ \text{mm}$ ,研究的方向是制备高精精密电子光栅、研究叠相还原方法由相位分布精确解算深度信息。

可见光干涉法的模式是全场测量,适用的场合是微观形貌高精度测量,存在的问题是测量范围小、对机械扫描机构的精细度要求高,精度量级为  $1\ \text{nm}$ ,研究的方向是提高条纹对比度以及最佳干涉位置的识别精度。

散斑干涉法的模式是全场测量,适用的场合是物面起伏高精度测量、三维位移场精密测量,存在的问题是噪声极大影响了条纹可见度和分辨率、难以测量热变形,精度量级为  $10\ \text{nm}$ ,研究的方向是滤波去噪处理方法、条纹高精度自动提取方法和优化相移算法。

单目视觉对焦法的模式是单点测量,适用的场合是场景深度信息测量,存在的问题是精度受环境光源、镜头焦深和景深影响,精度量级为  $1\ \text{cm}$ ,研究的方向是精确的聚焦位置计算。

单目视觉离焦法的模式是全场测量,适用的场合是场景深度信息测量,存在的问题是离焦模型难以精确标定,精度量级为  $1\ \text{nm}$ ,研究的方向是高精度标定离焦模型。

光度立体法的模式是全场测量,适用的场合是单视角条件下物体三维结构重建与测量,存在的问题是对光源要求较高、平行光源不易制备,精度量级为相对误差  $7\%$ ,研究的方向是在近光源条件下如何建立物面结构与二维图像的投影模型以及与飞行时间法等主动式方法相结合。

多视图重建法的模式是全场测量,适用的场合是小型物件精密建模与测量、楼房和街道等大范围场景重建与测量,存在的问题是误差传递累积效应、计算量巨大、测量耗时、要求目标有一定纹理,精度量级为相对误差  $1/10000$ ,研究的方向是提高图像匹配和相机定向精度、减少累计误差、提高算法执行效率。

每种重建测量方法都有其适用范围和优势,同时也受原理及测量设备制约而存在各种问题,目前许多非接触式三维重建测量设备往往结合不同方法组合测量,以达到扩大量程、提高精度、提高效率等目的。在实际测量过程中,需要根据实际的精度需求、环境约束、成本控制、时效性要求等各方面情况,综合考虑制定合适的测量方案,并在必要时进行相应改进,从而搭建出所需的非接触式三维重建测量系统。

## 参 考 文 献

- [1] Krajewski G, Woźniak A. Simple master artefact for CMM dynamic error identification[J]. Precision Engineering, 2014, 38(1): 64-70.
- [2] Huang Qiangxian, Yu Fuling, Gong Ermin, *et al.* Nano-CMM stage with zero Abbe error and its error analysis[J]. Optics and Precision Engineering, 2013, 21(3): 664-671.  
黄强先, 余夫领, 宫二敏, 等. 零阿贝误差的纳米三坐标测量机工作台及误差分析[J]. 光学精密工程, 2013, 21(3): 664-671.
- [3] Li Jianli, Xin Qianqian, Tian Li, *et al.* A review of online measurement method for large forgings [J]. New Industrialization Strategy, 2014, 4(1): 59-64.  
李建丽, 辛倩倩, 田 丽, 等. 大型锻件在线尺寸测量方法综述[J]. 新型工业化, 2014, 4(1): 59-64.
- [4] Xiong Lilang, Qian Dong, Li Haizhu. Overview of three-dimensional reconstruction based on real-time[J]. Journal of Communication University of China(Science and Technology), 2013, 20(6): 38-43.  
熊利郎, 潜 冬, 李海珠. 基于实时性的三维重建综述[J]. 中国传媒大学学报(自然科学版), 2013, 20(6): 38-43.
- [5] Akuta T, Negishi Y. Development of an automatic 3-D shape measurement system using a new auto-focusing method [J]. Measurement, 1991, 9(3): 98-103.
- [6] Liu Ziwei, Xu Tingfa, Wang Hongqing, *et al.* Theory and implementation of depth photography[J]. Infrared and Laser Engineering, 2016, 45(7): 242-246.  
刘子伟, 许廷发, 王洪庆, 等. 深度成像理论与实现[J]. 红外与激光工程, 2016, 45(7): 242-246.
- [7] Markus-Christian A, Thierry M, Marc L, *et al.* Laser ranging: a critical review of unusual techniques for distance measurement[J]. Optical Engineering, 2001, 40(1): 10-19.
- [8] Li Yonghuai, Feng Qibo. Overview of optical 3D profile measurement[J]. Laser & Infrared, 2005, 35(3): 143-147.  
李永怀, 冯其波. 光学三维轮廓测量技术进展[J]. 激光与红外, 2005, 35(3): 143-147.
- [9] Wang Feng. Implementation of a new algorithm for heterodyne displacement measurement based on heterodyne sinusoidal phase modulation[D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences, 2010.  
王 锋. 外差式正弦相位调制纳米位移测距试验新算法的实现[D]. 北京: 中国科学院大学, 2010.
- [10] Wang Xiaojia, Gao Jun, Wang Lei. Survey on the laser triangulation[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2004, 25(z3): 601-608.  
王晓嘉, 高 隽, 王 磊. 激光三角法综述[J]. 仪器仪表学报, 2004, 25(z3): 601-608.
- [11] Guo Hongwei, Chen Mingyi. Analysis of 3-D coordinate vision measuring methods with feature points on workpiece [J]. Optics and Precision Engineering, 2000, 8(2): 192-198.  
郭红卫, 陈明仪. 工件特征点三维坐标视觉测量方法综述[J]. 光学精密工程, 2000, 8(2): 192-198.
- [12] Yoshida K, Shigeo H. Laser triangulation range finder available under direct sunlight [C]. IEEE International Conference on Robotics and Automation, 1988, 24(5): 1702-1708.
- [13] Yuan Manman, Mu Ping'an, Dai Shuguang. Installation error calibration based on line structure improved ICP optical scanning system[J]. Electronic Science and Technology, 2016, 29(6): 178-181.  
袁满满, 穆平安, 戴曙光. 基于改进 ICP 算法的线结构光扫描系统误差校准[J]. 电子科技, 2016, 29(6): 178-181.
- [14] Araki K, Shimizu M, Noda T, *et al.* A high-speed and continuous 3D measurement system[J]. Machine Vision and Applications, 1995, 8(2): 79-84.
- [15] Liu Bin, Shen Kang, Wei Zhaochao, *et al.* High-precision measurement system for micro-diameter based on structured-light vision technology[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2014, 35(C2): 126-129.  
刘 斌, 沈 康, 魏兆超, 等. 基于线结构光视觉技术的微小直径高精度测量系统[J]. 仪器仪表学报, 2014, 35(C2): 126-129.
- [16] Xie Zexiao, Chen Wenzhu, Chi Shukai, *et al.* Industrial robot positioning system based on the guidance of the structured-light vision[J]. Acta Optica Sinica, 2016, 36(10): 1015001.  
解则晓, 陈文柱, 迟书凯, 等. 基于结构光视觉引导的工业机器人定位系统[J]. 光学学报, 2016, 36(10): 1015001.
- [17] Lilienblum E, Al-Hamadi A. A structured light approach for 3D surface reconstruction with a stereo line-scan system [C]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2015, 64(5): 1266-1274.

- [18] Yee S R, Griffin P M. Three-dimensional imaging system[J]. *Optical Engineering*, 1994, 33(6): 2070-2075.
- [19] Commean P K, Smith K E, Bhatia G H, *et al.* Geometric design of a multisensor structured light range digitizer[J]. *Optical Engineering*, 1994, 33(4): 1349-1358.
- [20] Ito M, Ishii A. A three-level checkerboard pattern (TCP) projection method for curved surface measurement [J]. *Pattern Recognition*, 1995, 28(1): 27-40.
- [21] Li Biao, Wu Haitao, Zhang Jiancheng, *et al.* 3D shape measurement method combining sinusoidal pulse width modulation fringe with phase coding fringe[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2016, 45(6): 179-184.  
李彪, 吴海涛, 张建成, 等. 正弦脉冲宽度调制条纹结合相位编码条纹的三维测量方法[J]. *红外与激光工程*, 2016, 45(6): 179-184.
- [22] Liu Weiliang. Research on large forgings image processing algorithms based on structured light three-dimensional measurement[D]. Shanghai: Donghua University, 2014.  
刘卫亮. 基于结构光三维测量的大锻件图像处理算法的研究[D]. 上海: 东华大学, 2014.
- [23] Pikas J, Summa J. 3D structured light measurement and analysis of corrosion and related defects[C]. Dallas: Corrosion Conference and Expo, 2015, 2(7): 1-16.
- [24] Chen X D, Yang Y H. Scene adaptive structured light using error detection and correction[J]. *Pattern Recognition*, 2015, 48(1): 220-230.
- [25] Yu Yongyan, Shu Yuqin. 3D measurement and reconstruction based on structured light [C]. Chongqing: First International Conference on Information Sciences, Machinery, Materials and Energy, 2015.
- [26] Luo Bing, Xue Min. PMP phase unwrapping new method based on plain estimation [J]. *Computer Measurement & Control*, 2016, 24(9): 43-46.  
罗兵, 薛敏. 基于平面估计的三维测量相位展开新方法[J]. *计算机测量与控制*, 2016, 24(9): 43-46.
- [27] Yang Yang, Long Yunfei, Wu Wei, *et al.* Eliminating phase error caused by multi-path effect for phase measuring profilometry [J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2015, 27(4): 73-77.  
杨洋, 龙云飞, 吴炜, 等. 消除相位测量轮廓术中多路径效应的影响[J]. *强激光与粒子束*, 2015, 27(4): 73-77.
- [28] Liu Chen, Fei Yetai, Lu Rongsheng, *et al.* 3-D active vision sensing technique [J]. *Semiconductor Optoelectronics*, 2006, 27(5): 618-621.  
刘晨, 费业泰, 卢荣胜, 等. 主动三维视觉传感技术的研究[J]. *半导体光电*, 2006, 27(5): 618-621.
- [29] Cheng Dongmei. Research on 3D profile measurement based on phase unwrapping in time domain[D]. Tianjin: Tianjin University, 2004.  
程冬梅. 基于时域相位展开三维轮廓测量的研究[D]. 天津: 天津大学, 2004.
- [30] Chen L C, Nguyen X L, Zhang F H, *et al.* High-speed Fourier transform profilometry for reconstructing objects having arbitrary surface colours [J]. *Journal of Optics*, 2010, 12(9): 095502.
- [31] Da F P, Huang H. A fast, accurate phase unwrapping method for wavelet-transform profilometry [J]. *Optics Communications* 2012, 285(4): 421-432.
- [32] Chen Liang-Chia, Hai Hoang Hong. Fourier transform profilometry employing novel orthogonal elliptic band-pass filtering for accurate 3-D surface reconstruction [J]. *Precision Engineering*, 2014, 38(3): 512-524.
- [33] Zhang Zonghua. Comparison of Fourier transform, windowed Fourier transform, and wavelet transform methods for phase calculation at discontinuities in fringe projection profilometry [J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2012, 50(8): 141-148.
- [34] Xiao Suzhi. Absolute phase retrieval for multiple spatially discontinuous objects based on fringe-coding [J]. *Acta Optica Sinica*, 2016, 36(12): 1212004.  
肖素枝. 基于编码光栅的空间不连续三维物体表面的绝对相位获取方法[J]. *光学学报*, 2016, 36(12): 1212004.
- [35] Geng Dongfeng, He Yingjie, Su Hongyi. Study on the measurement of transparent step by white-light interferometer [J]. *Optical Instruments*, 2013, 35(6): 74-77.  
耿东锋, 何英杰, 苏宏毅. 透明台阶的白光干涉测量方法研究[J]. *光学仪器*, 2013, 35(6): 74-77.
- [36] Bingleman L W, Schajer G S. DIC-based surface motion correction for ESPI measurements [J]. *Experimental Mechanics*, 2011, 51(7): 1207-1216.
- [37] Sun Liuxing, Yu Yingjie. Transient 3D deformation measurement method by color splitting based on phase shift and

- ESPI[J]. *Optical Instruments*, 2016, 38(1): 20-26.
- 孙流星, 于瀛洁. 基于相移和颜色分光的电子散斑干涉瞬态三维变形测量方法[J]. *光学仪器*, 2016, 38(1): 20-26.
- [38] Xu Huankun. Application and accuracy analysis of speckle interferometry[D]. Guangzhou: Guangdong University of Technology, 2012.
- 许焕坤. 散斑干涉技术的应用及其精度分析[D]. 广州: 广东工业大学, 2012.
- [39] Richoz G, Schajer G S. Simultaneous ESPI measurements using multiple wavelengths and a color camera [C]. *Advancement of Optical Methods in Experimental Mechanics*, 2014, 3: 349-356.
- [40] Wei Wei, Zheng Yongguo. The overview about 3D reconstruction of medical image based on ray-casting method[J]. *Computer Knowledge and Technology*, 2010, 6(10): 2470-2471.
- 魏 巍, 郑永果. 基于光线投射算法的医学图像三维重建方法综述[J]. *电脑知识与技术*, 2010, 6(10): 2470-2471.
- [41] Tong Shuai, Xu Xiaogang, Yi Chengtao, *et al.* Overview on vision-based 3D reconstruction[J]. *Application Research of Computers*, 2011, 28(7): 2411-2417.
- 佟 帅, 徐晓刚, 易成涛, 等. 基于视觉的三维重建技术综述[J]. *计算机应用研究*, 2011, 28(7): 2411-2417.
- [42] Sun Yuyang. A survey of 3D reconstruction based on single image [J]. *Journal of North China University of Technology*, 2011, 23(1): 9-13.
- 孙宇阳. 基于单幅图像的三维重建技术综述[J]. *北方工业大学学报*, 2011, 23(1): 9-13.
- [43] Wang Yu, Zhang Xu, Li Chen, *et al.* Study on the three-dimensional measurement technology based on light field imaging[J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2015, 36(6): 1311-1318.
- 王 宇, 张 旭, 李 晨, 等. 基于光场成像的三维测量方法的研究[J]. *仪器仪表学报*, 2015, 36(6): 1311-1318.
- [44] Yao Chengwen, Lei Hai, Chang Xinyu, *et al.* A new method for fast and precise measurement of 3D position of microspheres[J]. *Acta Optica Sinica*, 2017, 37(1): 0112002.
- 姚成文, 雷 海, 常新宇, 等. 微球三维位置快速精密测量的新方法[J]. *光学学报*, 2017, 37(1): 0112002.
- [45] Chen Yufeng, Tan Wenjing, Wang Haitao, *et al.* Photometric stereo 3D reconstruction and application[J]. *Journal of Computer-Aided Design & Computer Graphics*, 2005, 17(11): 28-34.
- 陈宇峰, 谭文静, 王海涛, 等. 光度立体三维重建算法[J]. *计算机辅助设计与图形学学报*, 2005, 17(11): 28-34.
- [46] Xu Ke, Zhou Peng, Yang Chaolin. On-line detection technique of tiny surface defects for metal plates and strips based on photometric stereo[J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2013, 49(4): 25-29.
- 徐 科, 周 鹏, 杨朝霖. 基于光度立体学的金属板带表面微小缺陷在线检测方法[J]. *机械工程学报*, 2013, 49(4): 25-29.
- [47] Cai Yiheng, Zhang Linlin, Sheng Nan, *et al.* 3D reconstruction of tongue surface based on photometric stereo method [J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2015, 37(11): 2564-2570.
- 蔡轶珩, 张琳琳, 盛 楠, 等. 基于光度立体法的中医舌体三维表面重建[J]. *电子与信息学报*, 2015, 37(11): 2564-2570.
- [48] Zhang Shanshan, Lü Donghui, Sun Jiuai. 3D reconstruction error analysis on photometric stereo with nearby light sources[J]. *Computer Technology and Development*, 2015, 25(1): 168-172.
- 张珊珊, 吕东辉, 孙九爱. 近光源光度立体三维重建误差分析[J]. *计算机技术与发展*, 2015, 25(1): 168-172.
- [49] Li Jian, Du Ruixi, Liang Jie, *et al.* Research on 3D digitizing method fusing RGB-D camera and photometric stereo[J]. *Journal of Shaanxi University of Science and Technology(Natural Science Edition)*, 2016, 34(4): 161-165.
- 李 健, 杜瑞希, 梁 洁, 等. 融合 RGB-D 相机和光度立体的三维数字化方法研究[J]. *陕西科技大学学报(自然科学版)*, 2016, 34(4): 161-165.
- [50] Fonstad M A, Dietrich J T, Courville B C, *et al.* Topographic structure from motion: a new development in photogrammetric measurement[J]. *Earth Surface Processes and Landforms*, 2013, 38(4): 421-430.
- [51] Wei Zhanyu, Arrowsmith Ramon, He Honglin, *et al.* Accuracy analysis of terrain point cloud acquired by "Structure from Motion" using aerial photos[J]. *Seismology and Geology*, 2015, 37(2): 638-648.
- 魏占玉, Arrowsmith Ramon, 何宏林, 等. 基于 SfM 方法的高密度点云数据生成及精度分析[J]. *地震地质*, 2015, 37(2): 638-648.
- [52] Goesele M, Snavely N, Curless B, *et al.* Multi-view stereo for community photo collections[C]. *IEEE International Conference on Computer Vision*, 2007: 1-8.

- [53] Chen Kun, Liu Xinguo. Global optimized multi-view 3D reconstruction method based on rays [J]. Computer Engineering, 2013, 39(11): 235-239.  
陈 坤, 刘新国. 基于光线的全局优化多视图三维重建方法[J]. 计算机工程, 2013, 39(11): 235-239.
- [54] Guan Qiu, Jin Junjie, Zhang Jianhua, *et al.* Non-sequential multi-view 3D reconstruction based on ac-ransac [J]. Journal of Zhejiang University of Technology, 2015, 43(5): 473-478.  
管 秋, 金俊杰, 张剑华, 等. 基于最优 RANSAC 算法的非增加式多视图三维重建[J]. 浙江工业大学学报, 2015, 43(5): 473-478.
- [55] Soheilian B, Paparoditis N, Vallet B. Detection and 3D reconstruction of traffic signs from multiple view color images [J]. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 2013, 77(3): 1-20.
- [56] Drizdal T, Paulides M M, Linthorst M, *et al.* Reconstruction of applicator positions from multiple-view images for accurate superficial hyperthermia treatment planning[J]. Physics in Medicine and Biology, 2012, 57(9): 2491-2503.
- [57] Cao Yu, Chen Xiuhong. 3D reconstruction method based on image silhouette [J]. Computer Engineering and Applications, 2012, 48(6) : 205-208.  
曹 煜, 陈秀宏. 基于图像轮廓的三维重建方法[J]. 计算机工程与应用, 2012, 48(6): 205-208.