

文章编号: 2095-2163(2022)03-0103-04

中图分类号: TP391

文献标志码: A

基于相位信息的三维视觉测量技术研究

丁玉洁, 周志峰

(上海工程技术大学 机械与汽车工程学院, 上海 201620)

摘要: 随着三维视觉技术广泛应用于类镜面测量, 对其精度的要求也日益严苛。基于相位信息的三维视觉测量技术, 向被测物表面投影条纹光, 然后获取经被测物表面调制后的图像, 解调出待测物的相位信息, 进而重建物体三维信息。通过论述相位测量轮廓术(PMP)和相位测量偏折术(PMD)的原理和检测流程, 分析出该检测系统的误差来源。重点论述了4种PMD系统模型, 用于克服相位测量偏折术的结果多义性问题。

关键词: 三维测量技术; 相位测量轮廓术; 相位测量偏折术; PMD系统模型

Research on 3d vision measurement technology based on phase information

DING Yujie, ZHOU Zhifeng

(School of Mechanical and Automotive Engineering, Shanghai University of Engineering Technology, Shanghai 201620, China)

[Abstract] As 3d vision technology is widely used in mirror like measurement, its accuracy requirements are increasingly demanding. Three-dimensional vision measurement technology based on phase information projectors structure light to the surface of the object to be measured, then obtains the modulated image of the surface of the object to be measured, demodulate the phase information of the object to be measured, and then reconstruct the three-dimensional information of the object. By discussing the principle and process of phase measurement profilometry(PMP) and phase measurement deflection(PMD), the error sources of the detection system are analyzed. Four PMD system models are emphatically discussed to overcome the ambiguity of the results of phase measurement deflection. Finally, the further research of phase deflection technique in precision measurement is summarized.

[Key words] three-dimensional measurement technology; phase measurement profilometry; phase measurement deflection; PMD system model

0 引言

随着现代工业的发展, 对于类镜面物体表面品质的要求越来越高。如: 汽车工业中的漆面、电子产品中的玻璃元件等, 对产品其表面光滑、无瑕疵的质量要求^[1]。早前, 人工检测是类镜面物体表面缺陷检测的主要手段, 该方法先通过人眼观察后, 利用触摸的方式实现缺陷检测。这种检测方式效率低且工作强度大。相比于人工检测, 传统机器视觉检测技术由于其非接触、高效率、高精度及自动化等优点, 在类镜面物体的质量控制过程里扮演着重要角色。传统机器视觉, 主要通过二维强度恢复三维景物, 此过程损失了深度信息, 该技术难以直接应用于类镜面的缺陷检测^[2]。

三维视觉测量通过模仿人眼进行测量, 应用计算机视觉技术对被观察对象进行识别、定位、量化和重构。三维视觉技术结合计算机视觉和精密测量技术, 与二维图像信息相比, 三维形貌能够提供更丰

富、更细节的信息, 从而更全面地描述三维场景属性。随着计算机和视觉技术的发展, 三维视觉测量由于其高速、无损、无接触的测试功能, 已经成为工业应用中用于质量控制、逆向工程、精密制造和艺术产品数字化的关键技术^[3]。目前, 国内基于结构光的三维测量技术已应用于汽车、航空航天等行业。天津大学叶声华院士团队将结构光三维视觉技术与机器人相结合, 成功应用于国内多家主流汽车生产企业。如一汽大众和东风神龙等, 实现了汽车领域高性能柔性在线检测应用^[3]。

基于相位信息的三维视觉检测技术虽然因其性能受到广泛关注, 但该技术的测量精度问题不容忽视。本文介绍两种典型的基于相位信息的三维视觉检测系统, 重点论述相位测量偏折技术结果多义性所引起的相位误差, 并总结4种克服该误差的PMD系统模型。最后对PMD系统相位信息的其它误差进行总结, 提出进一步研究的方向。

作者简介: 丁玉洁(1996-), 女, 硕士研究生, 主要研究方向: 机器视觉; 周志峰(1978-), 男, 博士, 副教授, 硕士生导师, 主要研究方向: 机器视觉、车辆自动导航驾驶。

通讯作者: 周志峰 Email: zhouzjtu@126.com

收稿日期: 2021-08-19

1 相位面结构光三维检测技术

相位测量轮廓术(PMP)和相位测量偏折术(PMD),是基于相位信息的三维视觉测量技术的重要分支。其中相位测量轮廓术是条纹投影测量技术典型代表之一,该技术主要是针对漫反射物体表面三维形貌的测量;而相位偏折术则是条纹反射测量技术典型代表之一,对镜面物体具有很好的测量效果^[3]。两者都使用面结构光照明的方式和典型的条纹结果光,其条纹分析过程,同样包括条纹解调和相位展开,都可以使用基于最小二乘法的相移算法来解调条纹图案等等。因此,两者存在相同的问题,都可以使用条纹分析中现有的解决方案(如数字光器件的非线性响应)解决。

综上所述,虽然两者有许多相同之处,但也有着根本的区别。PMP中检索到的相位值与高度数据直接相关,而PMD中的相位值则与斜率和高度相关。因此,在PMD中需要适当的正则化和数值积分^[3]。当测量部分镜面和漫反射表面时,这两种技术可以结合使用,利用PMP高度数据来规范PMD的反演问题。

1.1 相位测量轮廓术

PMP系统主要由数字投影仪、相机、计算机以及被测物组成。如图1所示,计算机生成条纹图案,投影仪将其依次放映投影于被测物体表面,计算机对相机采集的条纹图案进行分析及条纹相位展开,最后根据相位-高度积分得到三维信息^[4]。



图1 PMP 组件架构图

Fig. 1 PMP component architecture diagram

1.2 相位测量偏折术

普通PMD系统包括相机、LCD屏幕、计算机和被测物等组件。普通PMD系统是简单的单目固定式PMD系统,该系统光路原理较为简单,便于理解PMD的检测原理。如图2所示,计算机将生成的条纹图案发送给LCD屏,LCD屏将编制好的条纹图案投影到被测物体的表面,相机捕捉通过类镜面反射型被测面显示的条纹图案的反射图像,通过解决捕获图像的反演问题来重建被测表面的形状^[5]。

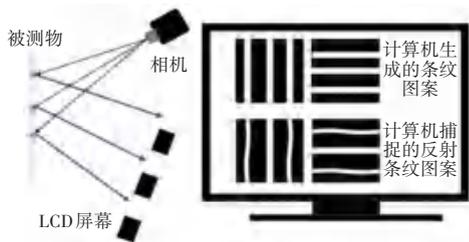


图2 PMD 组件架构图

Fig. 2 PMD component architecture diagram

相位测量偏折术的基本原理是反射技术^[6]。如图3所示,在理解相位偏折术光路原理时,可以将相机看作成光线发射源,被测物体表面看作自由理想镜面。当相机射线在被测物体表面上的任意一个元素点C发生镜面反射时,如果缺陷位置的切线相对于表面的角度变化为 α ,则反射光线的角度变化 2α ,类镜面缺陷斜坡引起的角度变化使反射的角度增加了一倍。

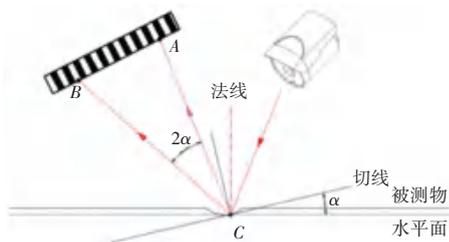


图3 PMD原理图

Fig. 3 The principle diagram of the PMD

2 相位精度影响因素研究

在针对该系统相位精度影响因素展开研究时,首先要清楚该检测系统的具体检测原理、流程以及其用到的组件。而后分析该过程中每一步可能产生影响的因素。

2.1 测量流程

面结构光照明检测技术,利用结构光照明及平面外相位信息,通过数码相机进行编码和记录;相机在获得经过被测物体调制的条纹图案后,利用成熟的条纹分析算法得到定量的相位值,以实现被测物体表面的三维测量。使用本文介绍的这两种系统进行测量步骤如下:

(1)正确布置相机、投影仪和屏幕,然后调节相机,保证视野可以覆盖所需求的测量体积,并将样本表面放置在测量体积内;通过投影仪或者LCD屏

幕,将计算机生成的条纹投影于被测物体表面。

(2)相机采集从被测表面捕捉的条纹图案,传入计算机进行相位比对。相机必须将每一张经过被测物表面调制而成的变形条纹图案采集,并保存至计算机;计算机对采集完成后相同种类或方向的变形条纹进行数据融合。

(3)通过结合相位计算方法和系统几何标定技术,分析条纹图案以检索二维相位信息,建立物体表面相位数据和高度之间的关系。

(4)通过积分来重建被测物体的深度信息。

2.2 相位精度影响因素

测量过程中相位误差的主要来源有:相位提取及相位展开算法中,相位测量轮廓术中的多次反射、相位偏折术中存在的系统多义性、数字器件的量化误差以及电子器件热噪声等引起的误差^[4]。

在相位测量轮廓术中,当待测物体表面反射特性不均匀(如:抛光部分的凹面体),当面结构光投影在该物体上,光线会在凹面体上经过多个反射路径进入相机成像系统,导致测量的相位出现错误。文献^[4]中分析了多次反射对相位的影响,通过高频与低频的对比实验,验证了基于高频照明消除多次反射的方法可将相位误差降低。

在实际测量中,物体的相位变化不仅来源于待测物体表面梯度也来源于待测物体高度的变化,而在相位偏折术测量系统中,忽略了高度对相位的影响,因此测量中出现了系统多义性,导致相位测量不准确。

3 相位测量偏折术多义性误差研究

相位测量偏折术通过解决相机捕获图像的反演问题,重建被测物体表面的形状。由于2.2节中所描述的结果多义性问题,将在本章分析结果多义性产生的原理,提出了4种多义性误差适应系统^[6],通过不同的正则化方法和相应设置调整反演问题。

3.1 结果多义性产生原理

如2.2节介绍,PMD组件设置时提到的PMD光路原理,存在结果多义性问题,也称为高度-斜率模糊问题^[6]。当LCD屏幕上的像素点 S 和该像素点经过相机光心,成像在 M 像素点时,就可以确定入射光线和反射光线的方向。结果多义性是指,没有办法确定入射光线和反射光线的交点 P ,这时法线的方向和 P 点到水平面的高度 h 均无法确定,则产生了高度-斜率模糊度问题。结果多义性光路示意如图4所示。

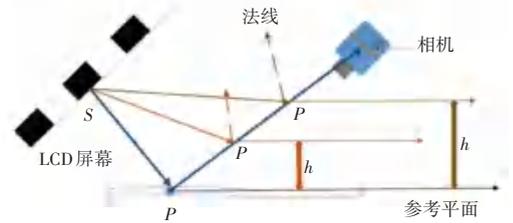


图4 结果多义性问题

Fig. 4 The result is the ambiguity problem

3.2 多义性误差适应系统

PMD系统模型根据多义性问题将其分为两类,区别之处在于是否克服了结果多义性问题,从而实现表面重建任务。在2.2节论述的PMD测量光路原理中,使用的是单视场固定PMD系统,属于第一类PMD系统模型。该方法虽然对于检测微米级的反射变形是一种简单的方法,但是该方法并没有克服结果多义性问题。本文这里论述的多义性误差适应系统为克服结果多义性的第二类系统模型。

多义性误差适应系统克服结果多义性的原理是采用额外的组件。如屏幕、距离传感器或相机。PMD系统的检测原理主要依赖梯度积分,来重建被测物体三维信息。在确定相机到被测表面之间的距离,以及LCD屏幕与被测表面之间的距离等系统几何参数后,多义性误差适应系统就可以测量出梯度,并通过梯度积分确定被测物的高度信息,从而克服高度-梯度模糊性而导致的结果多义性问题。下面分别介绍4种多义性误差适应系统模型(图5),论述其原理以及存在的缺陷。

图5(a)中,将PMD系统设置中的LCD屏幕设置为移动屏幕(具有移动屏幕的单目PMD模型最早由Marcus Petz等^[7]在2001年提出)。相机从同一像素点射出光线,通过平移LCD屏幕,会在两个屏幕上得到不同的绝对相位点,将两个绝对相位点相连,就可以确定入射光线的方向,避免了结果多义性问题。但该模型对系统标定要求较高,又因移动屏幕检测同一块区域,花费的检测时间较长。

图5(b)中,模型在PMD系统设置中安装点距离传感器。测量中用理想平面镜作标定平面时,在传感器读数保持不变的情况下,对多个倾斜方向的镜子进行相位测量。在模型测量过程中,可以适当的使用光线调整LCD屏幕、平面镜和相机的相对位置关系。该系统在测量位置表面时,需要采用标定期间确定的距离读数,因系统中的一个参数被完全确定,克服了PMD系统的结果多义性问题。但该

PMD 系统模型的标定步骤较为复杂,且精度要求较高,使用条件也较为苛刻。

图 5(c)中,模型使用立体视觉方式调整反演问题。在 PMD 系统中使用两个相机,两个相机都当作光线发射源,通过对比两个相机在被测屏幕同一点的不同法线差异,计算高度值。

图 5(d)中,模型也是通过立体视觉的方式调整反演问题。与图 6(c)不同的是,模型在 PMD 系统中增加了 1 个相机,以及与相机对应满足三角测量原理的 LCD 屏幕。该模型克服系统结果多义性问题的原理虽然与图 5(c)相同,但该立体视觉模型,基于一个假设。该假设是基于单目 PMD 测量,在反射表面上同一采样点处得到的法线必须一致。该系统模型对标定精度要求较低,但需要不断的假设交点来计算法线并比较,计算较为复杂且精度不稳定^[8]。

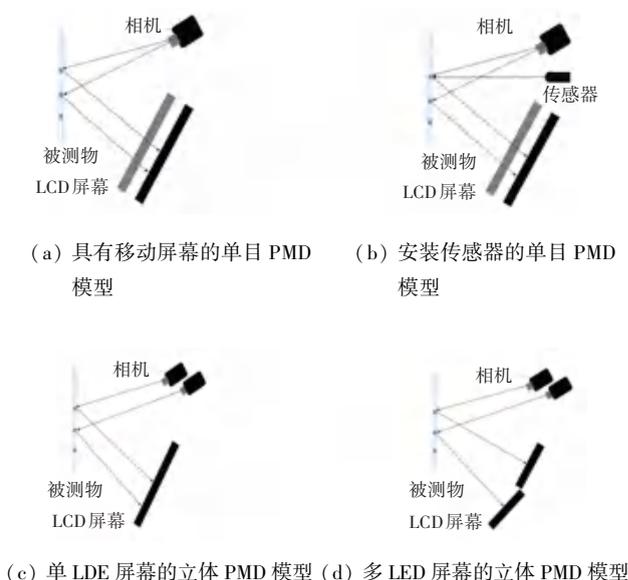


图 5 多义性适应模型

Fig. 5 Adaptive model of polysemy

4 结束语

本文主要介绍了两种典型的面结构光三维测量技术,回顾了相位测量轮廓术和相位测量偏折术的原理与误差来源,并且重点论述了相位测量偏折术测量过程中的相位误差消除系统。该技术不仅对面外形变化非常敏感,并且在测量相对变形时对系统标定误差容忍度更高,测量精度可以达到微米级,还可以在可见光范围之外工作。但其中相位恢复、绝对形状测量的精确校准是目前 PMD 技术的一个局限。

为了使 PMD 技术的标定更加灵活,易于使用并且在工业应用的实际测量中更加准确,在实际应用中需要对数字投影器件、相机的非线性效应、条纹投影时条纹质量、PMD 系统的几何标定和屏幕标定、模态重建时精度和速度等方面的性能还需要进一步的研究。

参考文献

- [1] 孔飞,张川,冯日华,等. 汽车车身漆膜缺陷自动检测系统[J]. 现代涂料与涂装,2017,20(3):57-61.
- [2] 张涛,刘玉婷,杨亚宁,等. 基于机器视觉的表面缺陷检测研究综述[J]. 科学技术与工程,2020,20(35):14366-14376.
- [3] 张宗华,刘巍,刘国栋,等. 三维视觉测量技术及应用进展[J]. 中国图象图形学报,2021,26(6):1483-1502.
- [4] 李斌. 面结构光三维系统相位测量精度研究[D]. 成都:电子科技大学,2017.
- [5] 姜硕,杨凌辉,任永杰,等. 基于相位偏折的类镜面物体表面缺陷检测[J]. 激光与光电子学进展,2020,57(3):113-121.
- [6] 陶迁,周志峰,吴明晖,等. 基于相位测量偏折术的反射表面缺陷检测[J]. 液晶与显示,2020,35(12):1315-1322.
- [7] MARCUS P, RAINER T. Measurement of optically effective surfaces by gratings [J]. The International Society for Optical Engineering, 2003(6):288-294.
- [8] KNAUER M C, KAMINSKI J, HAUSLER G. Phase measuring deflectometry: a new approach to measure specular free-form surfaces[J]. International Society for Optics and Photonics, 2004(11):366-376.

(上接第 102 页)

- [2] SMITH S T, LIM J J, PHILLIPS J R, et al. LAVA: A Conceptual Framework for Automated Risk Analysis [J]. Nuclear materials management, 1986, 15: 256-259.
- [3] CHAPMAN L D, HARLAN C P. Activities and trends in physical protection modeling with microcomputers [J]. Nuclear materials management, 1985, 14(3): 251-256.
- [4] BENNETT H A. EASI - An Evaluation Method for Physical Security System [J]. Nuclear Materials Management, 1977, 6(3): 371-379.
- [5] JONES D A. Physical Security and Vulnerability Modeling for Infrastructure Facilities[C]// Hawaii International Conference on System Sciences. IEEE, 2006,5(14):406-413.
- [6] 胡瑞敏,吕海涛,陈军. 基于风险熵和 Neyman-Pearson 准则的安防网络风险评估研究[J]. 自动化学报,2014,40(12):2737-2746.
- [7] ABRAHAM S, NAIR S. Cyber security analytics: a stochastic model for security quantification using absorbing Markov chains [J]. J.Communic. 2014, 9(12): 899-907.
- [8] 王洪苹. 安全防范系统的风险评估[D]. 重庆:西南大学,2017.
- [9] 刘宇. 基于系统动力学的安全防范系统效能仿真研究[D]. 北京:中国人民公安大学,2020.
- [10] 王清清,王昌伟,方文韬,等. 基于 EASI 模型的安全防范系统脆弱性分析[J]. 安全与环境工程,2020,27(6):126-132,186.