

文章编号: 1001-4888(2022)06-0784-11

基于投影 CCD 云纹的大视场高分辨 形貌测量方法^{*}

罗克演¹, 周士潮¹, 陈巨兵¹, 马沁巍², 马少鹏¹

(1. 上海交通大学 船舶海洋与建筑工程学院, 上海 200240; 2. 北京理工大学 宇航学院, 北京 100081)

摘要: 基于投影三角法的光学形貌测量系统存在测量分辨率和观测视场的矛盾, 限制了其在大视场高分辨形貌测量中的应用。针对这一问题, 本文将 CCD 云纹引入投影形貌测量中, 即将 CCD 靶面的周期性结构作为参考栅, 将投射到试件表面的超密栅线“放大”为粗条纹后采集并解析, 基于此发展了适用于大视场高分辨形貌测量的投影 CCD 云纹方法。用标准平板测量实验对投影 CCD 云纹法与传统投影云纹法的测量效果进行了比较, 结果表明投影 CCD 云纹法测量分辨率与投影云纹法相当, 但实验布置更为简单。用标准平板和球形物体形貌测量实验对比了投影 CCD 云纹法和投影栅线法的测量效果, 结果表明, 在测量分辨率相近的情况下, 投影 CCD 云纹法具有更大的观测视场。相对于投影栅线法, 投影 CCD 云纹法无需增加或改动实验硬件, 即可大大提高超密栅线的分辨能力, 因此可实现大视场高分辨形貌测量。

关键词: 投影栅线测量; CCD 云纹; 大视场; 形貌测量; 高分辨率

中图分类号: O348.1 **文献标识码:** A **DOI:** 10.7520/1001-4888-21-305

0 引言

大视场高分辨形貌测量是结构加工制造和服役状态监测的重要需求, 在这些场景中, 观测范围和形貌分辨率的差距一般在 5~7 个量级。这些场景既包括大尺寸结构的高分辨形貌测量^[1,2] (如几十至上百米火箭、飞机、船舶、桥梁等结构需测量毫米或亚毫米级的形貌), 同时也包括常规尺寸结构的超高分辨形貌测量^[3,4] (如几十厘米级齿轮、轴承、铣刀等结构需测量得到微米量级的形貌)。常见的形貌测量方法主要包括接触式和非接触式两类。接触式测量方法^[5-7] 通过将测量装置与被测物直接接触来获取三维形貌信息, 典型代表为机械式的三坐标测量机等。这类方法的形貌测量分辨率高, 但由于与被测物接触而限制了其在软体结构 (如大型薄膜天线)、高速运动结构 (如航空发动机叶片) 中的测量应用。非接触式测量方法以光学测量为典型代表, 因其全场测量、观测视场易调节等优势, 在很多场景中已成为形貌测量的主要手段。

在利用光学原理实现形貌测量方面, 国内外学者发展了多种测量方法。激光测距方法^[8,9] 利用调制激光频率/波长等产生的相位改变量来反推结构形貌, 其测量分辨率高, 但只能实现单点测量 (在对时间分辨率要求不高的测量场景中, 可通过扫描机构实现全场形貌测量)。摄像测量方法^[10,11] 通过相机获取待测结构的多视角图像, 并利用特征点匹配算法识别多视角图像中同名特征点的图像像素坐标, 然后根据相机成像模型和立体交会对接原理重建特征点三维坐标, 从而实现三维形貌测量。这类方法可

^{*} 收稿日期: 2021-12-27; 修回日期: 2022-01-16

基金项目: 国家自然科学基金(11727801, 11772053)资助

通信作者: 马少鹏(1974—), 男, 博士, 教授。主要研究领域: 光测实验力学。Email: mashaopeng@sjtu.edu.cn

实现动态场景下全场形貌测量,但要求待测结构表面具有或印制有特殊的标记图案(如散斑^[12]、网格^[13]等),在一定程度上限制了其在大型结构形貌测量中的应用。投影栅线法^[14-16]是一种常用的基于投影三角测量原理的形貌测量技术,其利用投影设备,将周期性栅线投射到待测结构表面,根据栅线相位与高度关系^[17-20],实现三维形貌测量。投影栅线法对待测结构表面无特殊标记图案要求,仅需投射周期性栅线即可实现形貌测量,其形貌测量分辨率与投射栅线在相机靶面(CCD 或 CMOS 传感器)上的成像周期有关:在栅线可分辨的情况下,栅线周期越小,形貌测量分辨率越高。但是,相机靶面物面分辨率的限制导致过密的投影栅线在大视场下无法分辨,因此投影栅线法难以应用于大视场高分辨形貌测量。

为了实现大视场高分辨形貌测量,需要对高密度栅线进行放大成像。其中一类放大成像的做法是在投影栅线法光路的基础上,在待测结构与成像系统之间添加一块参考栅^[21],或者在镜头和相机之间添加一块参考栅^[22],利用参考栅与待测结构表面反射的相机无法分辨的超密栅线发生相互作用,形成相机可分辨的低密度云纹,即投影云纹^[23-26]。由此可见,基于投影云纹可以实现大视场高分辨形貌测量,但是需要放置一个与被测结构表面同等尺寸量级的参考栅或者改变成像系统的光路布置,这无疑增加了形貌测量系统的复杂性。事实上,利用相机成像靶面像元结构的周期性,将成像靶面作为“参考栅”,与超密栅线发生相互作用,也可以形成相机可分辨的低密度云纹,即 CCD 云纹^[27]。利用 CCD 云纹的光学放大作用,相关学者在高分辨面内变形测量方面开展了较为系统的理论和实验研究^[28-31]。本文则将 CCD 云纹法与投影栅线法结合,发展了一种光路布置简单的大视场高分辨形貌测量方法(本文称之为投影 CCD 云纹法),并体系化地研究了该方法的形貌测量分辨能力。

本文第 1 部分介绍了投影 CCD 云纹法分辨密栅线的优势,并推导了投影 CCD 云纹法形貌测量模型。第 2 部分通过模拟和实验验证了投影 CCD 云纹法的形貌测量分辨能力,并体系化分析了投影 CCD 云纹法对密栅线的分辨能力。第 3 部分通过相同栅线密度下投影 CCD 云纹法与投影栅线法的形貌测量对比实验,验证了投影 CCD 云纹法可实现大视场高分辨形貌测量。第 4 部分对本文内容进行总结和展望。

1 测量原理

投影 CCD 云纹法是投影栅线法与 CCD 云纹法的结合,其测量形貌的光路与投影栅线法类似,如图 1(a)所示。投影 CCD 云纹法仅需在投影栅线法光路的基础上,调整成像设置使得投射栅线在 CCD 靶面上的像的栅线周期与 CCD 像元周期相近,即可采集到“放大”且携带形貌信息的低频栅线,即投影 CCD 云纹。

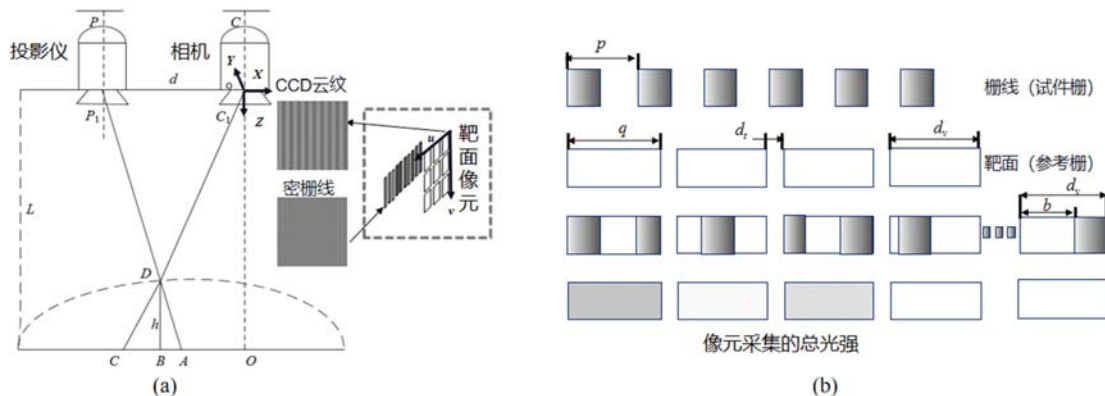


图 1 投影 CCD 云纹成像示意图:(a) 测量光路图;(b) CCD 云纹原理图

Fig. 1 Schematic diagram of projection CCD moiré imaging:

(a) measurement light path diagram; (b) principle diagram of CCD moiré

投影 CCD 云纹的形成过程如图 1(b)所示。高密度栅线通过透镜在成像靶面上成像为虚拟栅线(文中称之为试件栅)。周期性排布的靶面像元(周期为 q)与试件栅(周期为 p)相互“作用”,致使靶面像元采样的光照强度即像元白色区域 b 面积会呈周期性变化。研究^[30,31]发现当 p 与 q 相近时,可将相机

周期性靶面单元视为参考栅,此时,CCD 云纹周期公式符合几何云纹的周期公式,由文献[20]可知,在如图 1(a)所示的平行光路空间坐标系下 CCD 云纹光强度 $I(x, y)$ 表达式可简化为

$$I(x, y) \approx \frac{E}{2} + \frac{K}{4} \cos\left(\frac{2\pi(q-p)x}{pq} + \phi_0 - \phi_1 + \frac{2\pi d}{p}\right) \quad (1)$$

式中: E 为背景光强; K 为栅线调制参数; d 为相机与投影仪光心距离; p 为投影栅线像周期; q 为靶面像元周期; ϕ_0 表示投影仪光心处相位; ϕ_1 表示相机光心处相位。

在图 1(a)中,以 CCD 靶面与光轴交点(即主点)为原点建立世界坐标系 $O-XYZ$,以 CCD 靶面左上角点为原点建立图像像素坐标系 $o-uv$ 。据此,CCD 靶面上任一点 D 的世界坐标 (x, y) 和像素坐标 (u, v) 可以表述为

$$\begin{cases} x = qu + x_{u0} \\ y = qv + y_{v0} \end{cases} \quad (2)$$

式中 x_{u0} 、 y_{v0} 为图像像素坐标系原点在世界坐标系 $O-XYZ$ 下的坐标。将式(2)代入式(1)中,得图像像素坐标系下 CCD 云纹光强度 $I(u, v)$ 表达式为

$$I(u, v) \approx \frac{E}{2} + \frac{K}{4} \cos\left(\frac{2\pi(q-p)u}{p} + \phi_0 - \phi_1 + \frac{2\pi d}{p} + \frac{2\pi(q-p)x_{u0}}{pq}\right) \quad (3)$$

由式(3)可得出此时 CCD 云纹的周期 T_u 为

$$T_u = \frac{p}{|p-q|} \quad (4)$$

由于 p 与 q 十分接近, $1/|p-q|$ 的值远大于 1,因此 CCD 云纹周期远大于栅线周期 p ,即 CCD 云纹具有放大、分辨密栅线的作用,从而提升了大视场下相机分辨高密度栅线变形信息的能力,为大视场高分辨测量提供了条件。

由式(3)可得,CCD 云纹的绝对相位 $\phi(u, v)$ 为

$$\phi(u, v) = \frac{2\pi(q-p)u}{p} + \phi_0 - \phi_1 + \frac{2\pi d}{p} + \frac{2\pi(q-p)x_{u0}}{pq} \quad (5)$$

将绝对相位 $\phi(u, v)$ 代入到文献[20]中的相位高度模型,得高度 z 与 CCD 云纹相位之间的关系为

$$\begin{cases} h(u, v) = \frac{M(u, v) + N(u, v)\phi(u, v)}{1 + W(u, v)\phi(u, v)} \\ z = L - h(u, v) \end{cases} \quad (6)$$

式中: $h(u, v)$ 为待测物相对于图 1(a)参考平面 CA 的高度; L 为相机到平面距离; $M(u, v)$ 、 $N(u, v)$ 、 $W(u, v)$ 是与像素坐标相关的系统参数。

2 分辨率验证与分析

2.1 模拟实验验证

以图 1(a)为模拟实验光路,用程序模拟投影 CCD 云纹法测量形貌的过程,以验证方法的有效性。在模拟实验中,相机分辨率为 $512\text{pixel} \times 512\text{pixel}$,CCD 像元大小为 $6\mu\text{m}$,镜头焦距 $F=4\text{mm}$,测量参考面大小为 $1.23\text{m} \times 1.23\text{m}$,投影仪与相机水平距离 $d=350\text{mm}$,相机到平面距离 $L=1600\text{mm}$,投影到参考平面栅线周期为 2.6mm 。根据文献[28,29],CCD 云纹由投射到靶面像元上的密栅线采样生成。本文实验中,生成的 CCD 云纹以及初始相位如图 2 所示。

给定三种形貌表达式,分别为等高形貌 $z(x, y)=5$ 、线性形貌 $z(x, y)=y$ 以及非线性形貌 $z(x, y)=0.6168\text{peaks}(x, y)$,其中 $\text{peaks}(x, y)$ 表达式为

$$\text{peaks}(x, y) = 3(1-x)^2 e^{-x^2-(y+1)^2} - 10\left(\frac{x}{5} - x^3 - y^5\right) e^{-x^2-y^2} - \frac{1}{3} e^{-(x+1)^2-y^2} \quad (7)$$

三种形貌下调制的 CCD 云纹如图 3 所示。

根据三种形貌类型下的 CCD 云纹图像以及初始 CCD 云纹图像,可得三种形貌引起的相位变化,如图 4 所示。

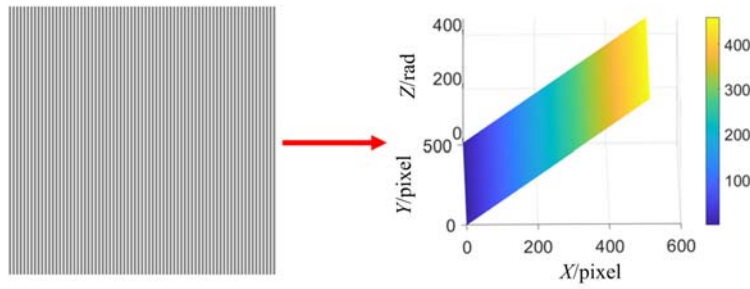


图 2 初始 CCD 云纹图像及其初始相位场

Fig. 2 Initial CCD moiré image and its initial phase field

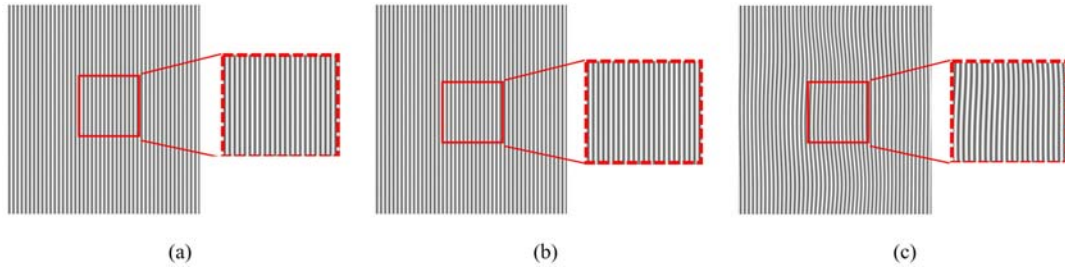


图 3 不同形貌下 CCD 云纹图像:(a) 等高形貌;(b) 线性形貌;(c) 非线性形貌

Fig. 3 CCD moiré images with different morphologies:

(a) isometric morphologies; (b) linear morphologies; (c) nonlinear morphologies

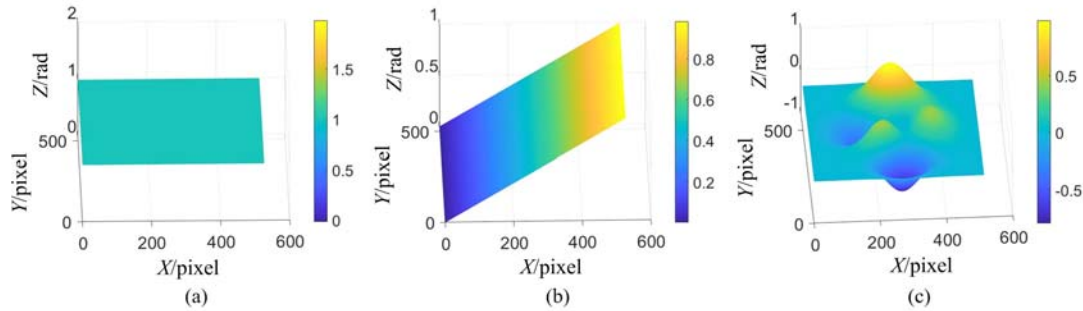


图 4 三种形貌类型引起的 CCD 云纹相位变化量:(a) 等高形貌;(b) 线性形貌;(c) 非线性形貌

Fig. 4 Phase changes of CCD moiré caused by three morphologies

(a) isometric morphologies; (b) linear morphology; (c) nonlinear morphology

三种形貌对应的绝对相位 ϕ 可表示为初始 CCD 云纹图像相位 ϕ_0 与三种形貌引起的相位变化量 $\Delta\phi$ 之和。将得到的三种形貌对应的绝对相位 ϕ 代入式(6)即可得到三种形貌高度 z 。式(6)中系统参数 $M(u, v)$ 、 $N(u, v)$ 、 $W(u, v)$ 可由初始 CCD 云纹图像相位 ϕ_0 和光路系统参数表示为

$$\begin{cases} M(u, v) = \frac{-L\phi_0(u, v)}{2\pi fd - \phi_0(u, v)} \\ N(u, v) = \frac{L}{2\pi fd - \phi_0(u, v)} \\ W(u, v) = \frac{1}{2\pi fd - \phi_0(u, v)} \end{cases} \quad (8)$$

式中: $\phi_0(u, v)$ 为参考平面位置处的相位值; f 为栅线空间频率; L 为相机到平面距离; d 为投影仪与相机水平距离。

在获得高度信息后将像素坐标 (u, v) 代入式(2)中即得到图像像素点在世界坐标系下的坐标 (x_{cd}, y_{cd}) 。最后, 利用小孔成像原理, 将 (x_{cd}, y_{cd}) 、镜头焦距 F 、待测物形貌高度 z 代入到式(9)得到待测物世界坐标 (x, y) , 结合式(6)中得到的待测物世界坐标 z 即获得待测物三维坐标 (x, y, z) 。

$$\begin{cases} x = \frac{x_{ad}z}{F} \\ y = \frac{y_{ad}z}{F} \end{cases} \quad (9)$$

模拟实验结果如表 1 及图 5 所示。三种情况下形貌计算结果的均方根误差均小于 0.03mm, 该模拟结果证明了投影 CCD 云纹法可以有效地测量形貌。

表 1 投影 CCD 云纹法形貌计算结果的均方根误差

Tab. 1 Root mean square error of topography calculation results by projection CCD moiré method

形貌类型	等高形貌	线性形貌	非线性形貌
均方根误差/mm	0.006	0.013	0.024

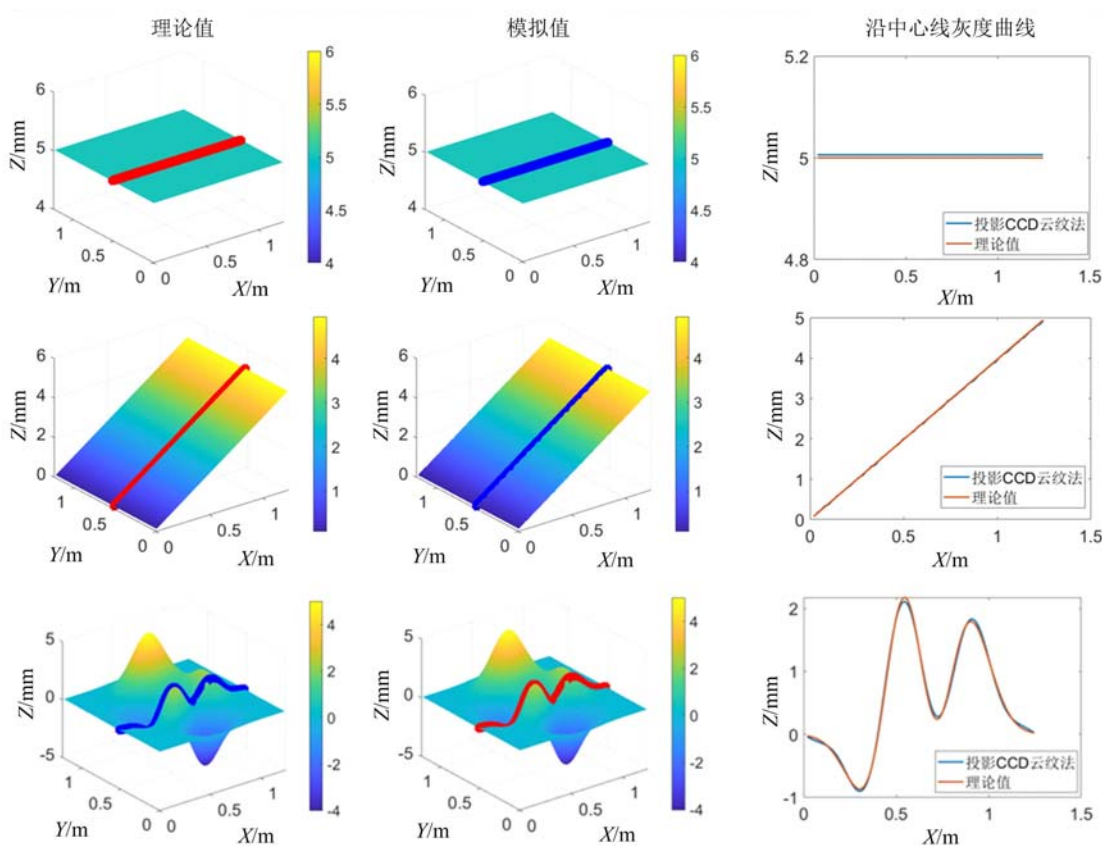


图 5 理论形貌与模拟计算形貌对比图

Fig. 5 Comparison between theoretical morphology and simulated morphology

2.2 真实实验验证

本节通过标准平板形貌测量实验验证投影 CCD 云纹法的形貌测量分辨率(与投影云纹法形貌测量结果对照)。分别搭建基于投影 CCD 云纹的平板测量实验系统(如图 6(a)所示)和基于投影云纹的平板测量实验系统(如图 6(b)所示),为保证实验结果的可对比性,两个实验系统的平移台和控制器相同(型号:Newport GTS150,位移精度:1.0 μ m),均使用尺寸为 60cm $\times$ 40cm 的标准平板(平移量分别设置为 5mm、10mm、15mm、20mm、25mm、30mm)。

在投影 CCD 云纹标准平板形貌测量实验中,因相机像元尺寸较小(仅为 4.8 μ m),为形成投影 CCD 云纹,需要投射高度密集的栅线,因此选用高分辨率投影仪(Optoma HEF9237,分辨率为 3840pixel $\times$ 2160pixel)。同时,考虑到用于形成投影 CCD 云纹的相机距离平板较远(物距约 4.5m),易引入扰动因素的特点,相机采集多帧图像平均灰度以减小随机噪声,并采用了相位误差消除方法^[32,33],以消除系统

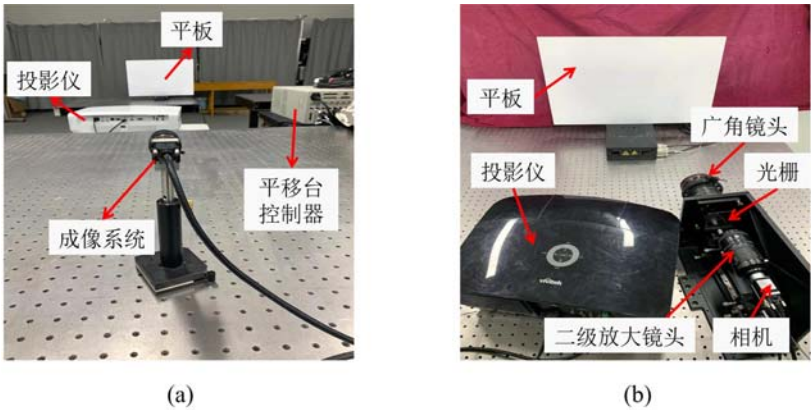


图 6 形貌测量分辨率对比实验:(a) 投影 CCD 云纹系统;(b) 投影云纹系统
Fig. 6 Comparison experiment of topography measurement resolution:
(a) projection CCD moiré system; (b) projection moiré system

扰动误差。投影 CCD 云纹法采集到的图像如图 7(a)所示,其视场大小为 $1.10\text{m} \times 0.88\text{m}$ 。

在投影云纹测量平板实验中,由于人工光栅(即投影云纹用到的参考栅)周期为 $32\mu\text{m}$,采用分辨率稍低的投影仪(Vivitek D5280U,分辨率为 $1920\text{pixel} \times 1080\text{pixel}$)。由于光栅经过二级镜头的放大作用会使得生成的云纹含有高频的细栅线,因此,在图像采集中除多采平均外,还采用文献[34]中离散栅线平均方法去除高频栅线。投影云纹法采集到的图像如图 7(b)所示,其视场大小为 $0.60\text{m} \times 0.40\text{m}$ 。

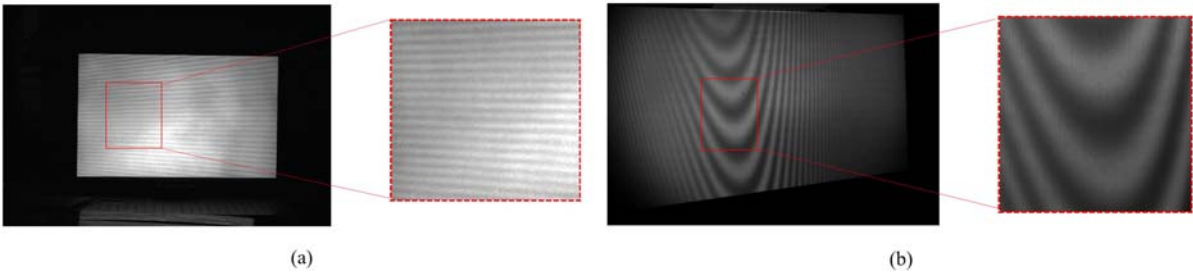


图 7 (a) 投影 CCD 云纹图像;(b) 带有高频栅线的投影云纹图像
Fig. 7 (a) projection CCD moiré image; (b) projection moiré images with high frequency grid lines

采用相移法获得投影 CCD 云纹图像和投影云纹图像的绝对相位,并代入式(6),得到不同位置下的平板形貌。投影 CCD 云纹法和投影云纹法复原的六个位置下的平板测量结果如图 8 所示。投影 CCD 云纹法与投影云纹法测量平板高度的均方根误差见表 2。

表 2 投影 CCD 云纹法和投影云纹法离面位移测量结果的均方根误差(单位:mm)
Tab. 2 Root mean square error of off-plane displacement measured by projection
CCD moiré method and projection moiré method (unit: mm)

高度	投影 CCD 云纹法:RMS	投影云纹法:RMS
5	0.060	0.040
10	0.064	0.029
15	0.065	0.041
20	0.068	0.036
25	0.069	0.053
30	0.054	0.043

实验结果表明,同离面位移下,投影 CCD 云纹法与投影云纹法具有同等量级的形貌分辨率。但对比两种方法可发现,投影 CCD 云纹法略去了投影云纹法中需布置的参考光栅以及复杂的二级成像实验装备,仅需投影仪、相机即可完成测量,极大地简化了实验流程。

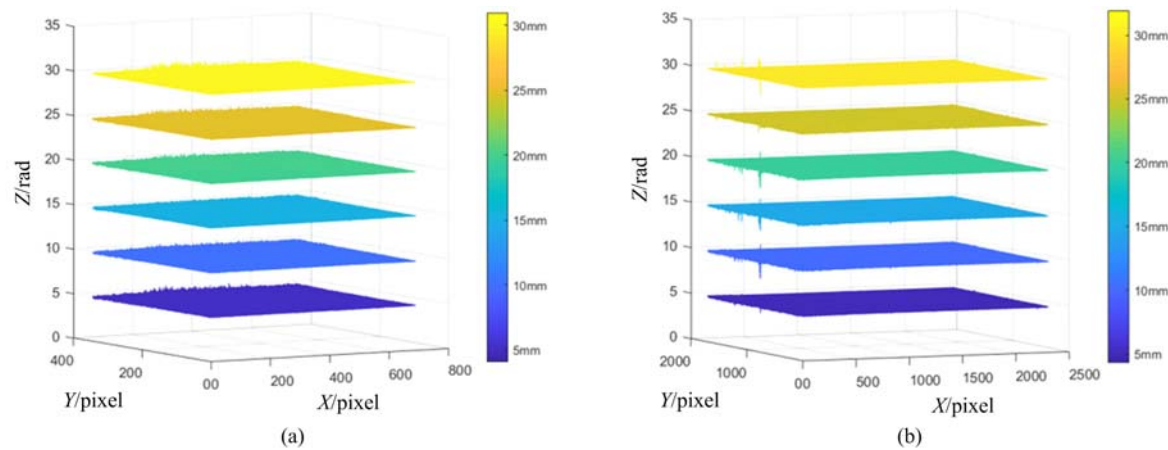


图 8 不同位置下平板形貌重建结果:(a) 投影 CCD 云纹法;(b) 投影云纹法
Fig. 8 Reconstruction results of flat surface topography at different positions:
(a)projection CCD moiré method; (b) projection moiré method

为进一步研究投影 CCD 云纹法对密栅线的分辨能力,本文利用图 6(a)所示的投影 CCD 云纹标准平板形貌测量实验系统,研究了固定视场、不同栅线密度下投影栅线法以及投影 CCD 云纹法的形貌测量分辨率。其中,投射的栅线周期见表 3,标准平板移动距离为 5mm。测量结果如表 3 和图 9 所示。

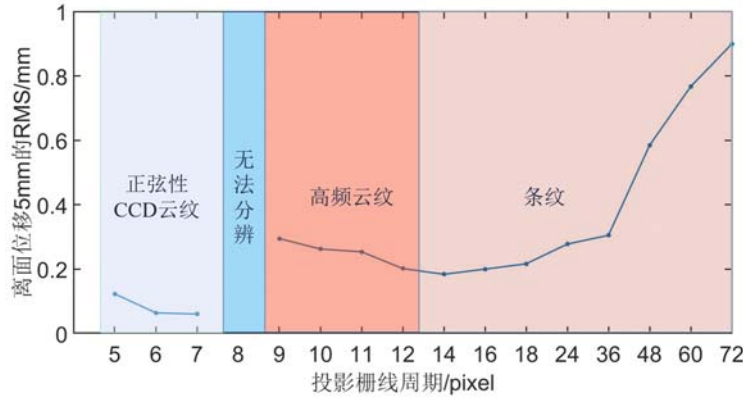


图 9 不同栅线周期下的离面位移测量误差变化图
Fig. 9 Variation diagram of out-of-plane displacement measurement error under different grid line periods

表 3 不同栅线周期下离面位移测量结果的均方根误差

Tab. 3 Root mean square error of measurement results of off-plane displacement under different grid periods								
栅线周期/pixel	72	60	48	36	24	18	16	14
均方根 MSE/mm	0.899	0.767	0.585	0.305	0.278	0.217	0.200	0.1843
栅线周期/pixel	12	11	10	9	8	7	6	5
均方根 MSE/mm	0.202	0.254	0.263	0.295	NAN	0.061	0.065	0.124

实验结果表明,当栅线周期为 14pixel~72pixel 时,栅线周期越小(栅线密度越大),投影栅线法的测量分辨率越高;当栅线周期进一步降低(12pixel~9pixel),相机采集的图像中栅线质量逐渐降低,导致栅线图像相位解析产生相位误差,使得投影栅线法测量分辨率降低(甚至在栅线周期为 8pixel 时,出现无法解析相位的问题);当栅线周期降低至与相机 CCD 靶面像元尺寸相近时,获得了具有正弦光强分布的投影 CCD 云纹,使测量分辨率急剧提升,且投影 CCD 云纹的测量分辨率优于投影栅线法(相同视场下);最后,栅线周期进一步降低(小于 5pixel),投影 CCD 云纹的正弦性减弱,测量分辨率也随之降低。

由实验结果可知,相同视场下,投影 CCD 云纹法测量分辨率优于投影栅线法,也可以说,相同投射栅线密度下,投影 CCD 云纹法的观测视场大于投影栅线法,即投影 CCD 云纹法可实现大视场下的高分辨形貌测量。

3 大视场高分辨形貌测量实验验证

本部分通过球形物体形貌测量实验来进一步验证投影 CCD 云纹法的有效性,以及在大视场下的高分辨形貌测量能力。具体地,投射周期为 6pixel 的栅线至同一视场的两个球形物体(直径分别为 117.4mm 和 40.0mm);搭建投影 CCD 云纹法光路和投影栅线法光路,分别采集投射有栅线的球体图像(图像采集设备均为 MQ013CG-ON Ximea 相机);为形成 CCD 云纹,投影 CCD 云纹法所用相机距球体约为 4.5m,所用镜头为 Computar M0814-MP2 25mm 定焦镜头(观测视场为 1.10m×0.88m);为能够清楚分辨 6pixel 周期栅线,投影栅线法所用相机距球体约为 3.0m,所用镜头为 HF7518V-2 75mm 定焦镜头(观测视场为 0.25m×0.20m)。投影 CCD 云纹实验系统和投影栅线实验系统拍摄的球体图像分别如图 10(a)、(b)、(c)所示。由图 10 可知,投影栅线法为分辨密栅线需牺牲观测视场,导致无法同时测量大、小球体形貌;而投影 CCD 云纹法通过放大密栅线使得相同投射栅线密度下可以同时测量大、小球体形貌。

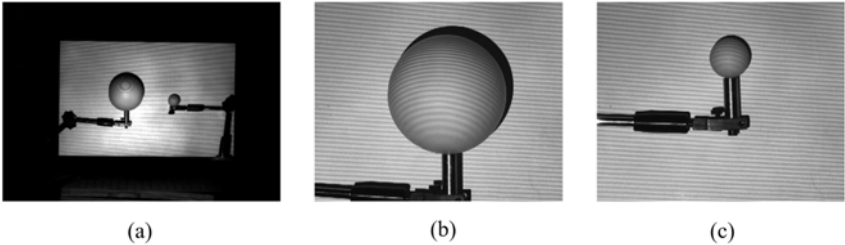


图 10 (a) 投影 CCD 云纹法拍摄图像;(b) 投影栅线法拍摄大球图像;(c) 投影栅线法拍摄小球图像
Fig. 10 (a) image shooting by projection CCD moiré method; (b) large sphere image shooting
by projection grid method; (c) small sphere image shooting by projection grid method

根据拍摄的球体图像,利用投影 CCD 云纹形貌测量方法和投影栅线形貌测量方法获得大、小球体的形貌后,再根据标定好的相机内外参数,获得世界坐标系下的球体表面点云坐标值(x, y, z),如图 11 和图 12 所示。将点云数据进行最小二乘拟合,得到大、小球体直径见表 4。

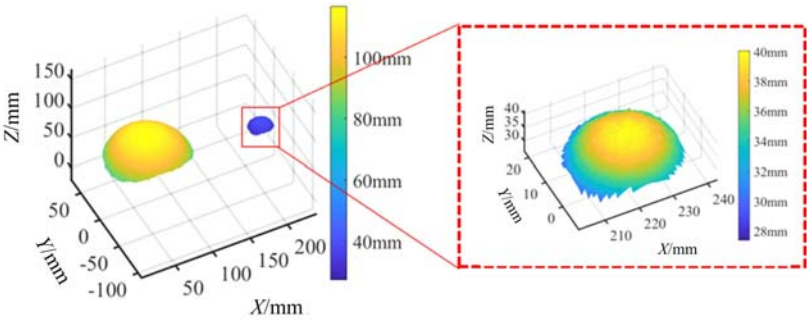


图 11 投影 CCD 云纹法球面测量结果
Fig. 11 Spherical measurement result of projection CCD moiré method

表 4 测量球面的直径拟合结果

Tab. 4 Measurement of spherical diameter fitting results

方法	投影 CCD 云纹法	投影栅线法
大球拟合直径/mm	117.680	117.840
小球拟合直径/mm	39.840	40.300

由表 4 可知,投影栅线法大球直径绝对误差为 0.44mm,小球直径绝对误差为 0.30mm;投影 CCD

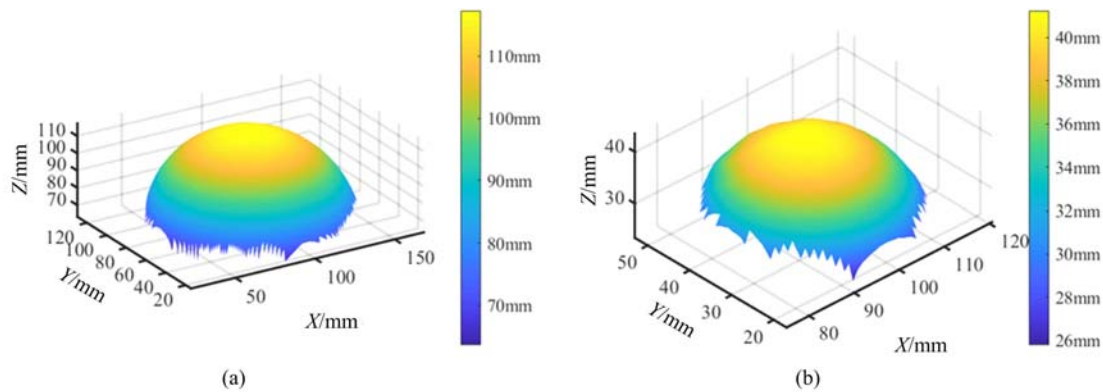


图 12 投影栅线法球面测量结果:(a) 大球;(b) 小球

Fig. 12 Spherical measurement results of projection grid method: (a) large sphere; (b) small sphere

云纹法大球直径绝对误差为 0.28mm,小球直径绝对误差为 0.16mm。两种方法的测量分辨率相近,但投影 CCD 云纹法的观测视场是投影栅线法的 19.4 倍。结果表明,投影 CCD 云纹法能够实现大视场下的高分辨率形貌测量。

4 结论

为解决投影栅线形貌测量中观测视场与测量分辨率之间的矛盾,本文引入 CCD 云纹法,利用 CCD 靶面周期性结构对投射到结构表面的超密栅线进行“放大”,发展了一种投影 CCD 云纹大视场高分辨形貌测量方法。通过实验研究发现:投影 CCD 云纹法的形貌测量分辨率与投影云纹法相当,但投影 CCD 云纹法的光路布置更加简单;相同视场下,投影 CCD 云纹法与投影栅线法相比,可分辨的栅线密度更大,形貌测量的分辨率更高;相同栅线密度下,投影 CCD 云纹法与投影栅线法相比,形貌测量分辨率相当,但投影 CCD 云纹法具有更大的观测视场。结果表明,本文提出的投影 CCD 云纹法可以实现大视场高分辨形貌测量。

参考文献:

- [1] 尚洋,于起峰,关棒磊,等. 大型结构变形监测摄像测量研究进展[J]. 实验力学, 2017, 32(5):593—600 (SHANG Yang, YU Qifeng, GUAN Banglei, et al. Recent advances of videometrics for large-scale structure deformation monitoring[J]. Journal of Experimental Mechanics, 2017, 32(5):593—600 (in Chinese))
- [2] 周翔,胡建,孙林涛,等. 大型结构变形实时摄像测量方法[J]. 实验力学, 2012, 27(4):503—510 (ZHOU Xiang, HU Jian, SUN Lintao, et al. A real-time camera measurement method for large-scale structure deformation[J]. Journal of Experimental Mechanics, 2012, 27(4):503—510 (in Chinese))
- [3] 陆鹏,张熹. 回转体三维扫描形貌测量及其应用[J]. 实验力学, 2012, 27(2):155—159 (LU Peng, ZHANG Xi. 3D scan method for measurement of profile and its application[J]. Journal of Experimental Mechanics, 2012, 27(2):155—159 (in Chinese))
- [4] 陈勐昊,王卓,张鹏,等. 基于立体视觉的齿轮轴系装配误差测量方法[J]. 机械传动, 2021, 45(5):139—145 (CHEN Menghao, WANG Zhuo, ZHANG Peng, et al. Assembly error measurement method of gear shafting based on stereo vision[J]. Mechanical Transmission, 2021, 45(5):139—145 (in Chinese))
- [5] 刘鹏,康秋红. 三坐标测量机误差补偿技术综述[J]. 重庆工商大学学报(自然科学版), 2008(3):243—246 (LIU Peng, KANG Qiuhong. Review of error compensation technology of 3-D Coordinate measuring machines[J]. Journal of Chongqing Technology and Business University (Natural Science Edition), 2008(3):243—246 (in Chinese))
- [6] Fujiwara M, Yamaguchi A, Takamasu K, et al. Evaluation of stages of Nano-CMM[C]. 10th International Conference on Precision Engineering, Yokohama, Japan, 2001.
- [7] 黄桂平,钦桂勤. 大尺寸三坐标测量方法与系统[J]. 宇航计测技术, 2007, 27(4):15—19 (HUANG Guiping, QIN Guiqin. Measurement methods of the large scale 3d coordinate and its system[J]. Journal of Astronautical

- Metrology and Measurement, 2007, 27(4):15—19 (in Chinese))
- [8] 傅愉, 陈冰, 阎可宇, 等. 综述: 面向工程应用的激光干涉动态测量[J]. 实验力学, 2021, 36(1):1—16 (FU Yu, CHEN Bing, YAN Keyu, et al. Engineering-oriented laser interferometric dynamic measurement: a review[J]. Journal of Experimental Mechanics, 2021, 36(1):1—16 (in Chinese))
- [9] Pehkonen J, Palojarvi P, Kostamovaara J. Receiver channel with resonance-based timing detection for a laser range finder[J]. IEEE Transactions on Circuits & Systems I Regular Papers, 2006, 53(3):569—577.
- [10] Baqersad J, Poozesh P, Niezrecki C, et al. Photogrammetry and optical methods in structural dynamics—a review [J]. Mechanical Systems & Signal Processing, 2017, 86:17—34.
- [11] 张立琴, 刘庆福. 摄影测量在大型雷达天线阵面测量中的应用[J]. 现代雷达, 2015, 37(4):77—80 (ZHANG Liqin, LIU Qingfu. Application of photogrammetry in large radar antenna array measurement[J]. Modern Radar, 2015, 37(4):77—80 (in Chinese))
- [12] 潘兵, 谢惠民, 李艳杰. 用于物体表面形貌和变形测量的三维数字图像相关方法[J]. 实验力学, 2007, 22(6): 556—567 (PAN Bing, XIE Huimin, LI Yanjie. Three-dimensional digital image correlation method for shape and deformation measurement of an object surface[J]. Journal of Experimental Mechanics, 2007, 22(6):556—567 (in Chinese))
- [13] Pierron F, Forquin P. Ultra-high-speed full-field deformation measurements on concrete spalling specimens and stiffness identification with the virtual fields method[J]. Strain, 2012, 48(5):388—405.
- [14] Takeda M, Mutoh K. Fourier transform profilometry for the automatic measurement of 3-D object shapes[J]. Applied Optics, 1983, 22(24):3977—3982.
- [15] Choi Y, Kim S. Phase-shifting grating projection moiré topography[J]. Optical Engineering, 1998, 37(3):1005—1010.
- [16] 乔闹生, 姚春梅, 赵华君, 等. 傅里叶变换轮廓术中物体高度最佳恢复条件[J]. 光子学报, 2009, 38(4):928—931 (QIAO Naosheng, YAO Chunmei, ZHAO Huajun, et al. Optimum restoration condition of object height in fourier transformation profilometry[J]. Acta Optica Sinica, 2009, 38(4):928—931 (in Chinese))
- [17] Li W, Su X, Liu Z. Large-scale three-dimensional object measurement: a practical coordinate mapping and image data-patching method[J]. Applied Optics, 2001, 40(20):3326—3333.
- [18] Huang J, Wu Q. A new reconstruction method based on fringe projection of three-dimensional measuring system [J]. Optics & Lasers in Engineering, 2014, 52:115—122.
- [19] 毛先富, 陈文静, 苏显渝, 等. 傅里叶变换轮廓术中新的相位及高度算法分析[J]. 光学学报, 2007, 27(2):225—229 (MAO Xianfu, CHEN Wenjing, SU Xianyu, et al. Analysis of new phase and height algorithm in fourier transform profilometry[J]. Acta Optica Sinica, 2007, 27(2):225—229 (in Chinese))
- [20] 韩皖贞, 于德敏, 周聪玲, 等. FTP 法三维轮廓测量系统的快速标定技术[J]. 天津科技大学学报, 2001(4):28—31 (HAN Wanzhen, YU Demin, ZHOU Congling, et al. A fast calibration technique of 3-D fourier transform profilometry[J]. Journal of Tianjin University of Science and Technology, 2001(4):28—31 (in Chinese))
- [21] Dirckx J J J, Decraemer W F. Optoelectronic moiré projector for real-time shape and deformation studies of the tympanic membrane[J]. Journal of biomedical optics, 1997, 2(2):176—185.
- [22] Buytaert J, Ribbens B, Vanlanduit S, et al. Aberration-free moiré profilometry-Analysis, simulation and implementation of the optimal setup geometry[J]. Optics & Lasers in Engineering, 2012, 50(8):1119—1129.
- [23] 唐颖, 姚骏, 陈巨兵. 一种基于投影云纹法的三维形貌测量技术及其标定方法[J]. 实验力学, 2018, 33(5):665—674 (TANG Ying, YAO Jun, CHEN Jubing. A 3D profile measurement technique and its calibration method based on projected moiré method[J]. Journal of Experimental Mechanics, 2018, 33(5):665—674 (in Chinese))
- [24] 彭达仁, 林洪. 借助位相检测的投影云纹自动测量三维物高[J]. 交通科学与工程, 1991(4):19—29 (PENG Daren, LIN Hong. Projection moiré with phase stepping for automated 3-D Topography[J]. Transportation Science and Engineering, 1991(4):19—29 (in Chinese))
- [25] Yao J, Ying T, Chen J. Three-dimensional shape measurement with an arbitrarily arranged projection moiré system[J]. Optics Letters, 2016, 41(4):717—720.
- [26] Yao J, Chen J. Research on the sensitivity of projection moiré system considering its variety in space[J]. Optics and Lasers in Engineering, 2018, 110:1—6.

- [27] Morimoto Y, Hayashi T. Deformation measurement during powder compaction by a scanning-moiré method[J]. *Experimental Mechanics*, 1984, 24(2):112–116.
- [28] Li J, Zhang Y, Wang J, et al. Formation mechanism and a universal period formula for the CCD moiré[J]. *Optics Express*, 2014, 22(17):20914.
- [29] Tu T, Goh W. Moiré patterns from a CCD camera—are they annoying artifacts or can they be useful? [C]. 4th International Conference on Computer Vision Theory and Applications, Lisbon, Portugal, 2009.
- [30] 李佳, 马少鹏, 朱海斌, 等. CCD 云纹方法的光学放大作用分析及其在干涉测量中的应用[J]. *实验力学*, 2020, 35 (1):12–20 (LI Jia, MA Shaopeng, ZHU Haibin, et al. Analysis of optical amplification of CCD moiré method and its application in interferometry[J]. *Journal of Experimental Mechanics*, 2020, 35 (1):12–20 (in Chinese))
- [31] Chang R, Sheu J, Lin C, et al. Analysis of CCD moiré pattern for micro-range measurements using the wavelet transform[J]. *Optics & Laser Technology*, 2003, 35(1):43–47.
- [32] Yao J, Xiong C, Zhou Y, et al. Phase error elimination considering gamma nonlinearity, system vibration, and noise for fringe projection profilometry[J]. *Optical Engineering*, 2014, 53(9):094102.
- [33] Pan B, Qian K, Huang L, et al. Phase error analysis and compensation for nonsinusoidal waveforms in phase-shifting digital fringe projection profilometry[J]. *Optics Letters*, 2009, 34(4):416–418.
- [34] Buytaert J, Dirckx J. Moiré profilometry using liquid crystals for projection and demodulation[J]. *Optics Express*, 2008, 16(1):179–193.

Large field of view high resolution topography measurement method based on projection CCD moiré

LUO Keyan¹, ZHOU Shichao¹, CHEN Jubing¹, MA Qinwei², MA Shaopeng¹

(1. School of Naval Architecture, Ocean and Civil Engineering, Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200240, China;

2. School of Astronautics, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China)

Abstract: The optical profile measurement system based on projection triangulation has a contradiction between the measurement resolution and the observation field of view, which limits its application of high resolution profile measurement in large field of view. In response to this problem, this paper introduced CCD moiré into the projection profile measurement, that is, the periodic structure of the CCD target surface was used as a reference grid, and the ultra-dense grid line projected on the surface of the specimen was “enlarged” into thick stripes, and then collected and analyzed. Based on this, a projection CCD moiré method suitable for large field of view and high-resolution topography measurement was developed. The measurement results of the projection CCD moiré method and the traditional projection moiré method were compared with the standard flat panel measurement experiment. The results show that the measurement resolution of the projection CCD moiré method is equivalent to that of the projection moiré method, but the experimental arrangement is simpler. The measurement results of the projection CCD moiré method and the projection grid method were compared with standard flat plate and spherical object shape measurement experiments. The results show that the projection CCD moiré method has a larger observation field when the measurement resolution is similar. Compared with the projection grid method, the projection CCD moiré method can greatly improve the resolution of the dense grid line without adding or changing the experimental hardware, so it can realize the large field of view and high-resolution topography measurement.

Keywords: projection grid measurement; CCD moiré; large field of view; topography measurement; high resolution