

条纹投影用于不同景深物体的三维测量

吴 荣^{1,2,3}, 赵世丽¹, 赵 洋⁴, 谢锋云^{1,2,3*}

- (1. 华东交通大学 机电与车辆工程学院, 江西 南昌 330013;
2. 载运工具与装备教育部重点实验室(华东交通大学), 江西 南昌 330013;
3. 华东交通大学 轨道交通基础设施性能监测与保障国家重点实验室, 江西 南昌 330013;
4. 南京理工大学 电子工程与光电技术学院, 江苏 南京 210094)

摘 要: 条纹投影轮廓术 (Fringe Projection Profilometry, FPP) 由于其非接触、测量精度高等特点被广泛应用于缺陷检测、逆向工程、计算机视觉等领域中。然而, 传统的 FPP 单次测量只能获得有限景深范围内的被测物体的三维轮廓, 无法完成视场范围内不同景深的多个被测物体的同时精确测量。文中在传统 FPP 系统的基础上增加两面反射镜和两个三棱镜, 搭建了一种镜面辅助的 FPP 系统。所提出的方法能将摄像机不同景深范围内的被测物体转换到同一景深范围内, 从而实现不同景深的多个被测物体的三维轮廓高精度测量。实验通过 6 层标准石膏阶梯模型验证了景深对三维轮廓测量结果的影响; 同时分别采用传统 FPP 和提出的 FPP 系统对不同景深范围内两个标准乒乓球同时进行了轮廓测量, 传统 FPP 测得的摄像机聚焦点处和未聚焦的乒乓球的拟合半径相对误差分别为 2.9%、34.3%, 而镜面辅助的 FPP 测得的相对误差分别为 2.7%、5.3%。结果表明: 文中提出的方法能补偿由于景深引起的误差, 从而验证了该方法在不同景深物体三维测量中的可行性。

关键词: 条纹投影; 轮廓测量; 不同景深; 镜面辅助

中图分类号: TN206 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA20220088

Fringe projection profilometry for 3D measurement of objects with different depth of fields

Wu Rong^{1,2,3}, Zhao Shili¹, Zhao Yang⁴, Xie Fengyun^{1,2,3*}

- (1. School of Mechatronic and Vehicle Engineering, East China Jiaotong University, Nanchang 330013, China;
2. Key Laboratory of Conveyance Equipment (East China Jiaotong University), Ministry of Education, Nanchang 330013, China;
3. State Key Laboratory of Performance Monitoring Protecting of Rail Transit Infrastructure, Ministry of Education, East China Jiaotong University, Nanchang 330013, China;
4. School of Electronic and Optical Engineering, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China)

Abstract: Fringe projection profilometry (FPP) was widely used in defect detection, reverse engineering, computer vision and other fields due to its non-contact and high measurement accuracy. However, traditional FPP can only obtain the 3D profile of the measured object within limited depth of field in a single measurement, and can not achieve accurate measurement of multiple measured objects with different depth simultaneously. A mirror-assisted FPP system was constructed by adding two mirrors and two prisms on the basis of traditional FPP system in this paper. The proposed method can transform the measured objects in different depth of field ranges to

收稿日期: 2022-04-10; 修订日期: 2022-05-20

基金项目: 国家自然科学基金 (52265068); 江西省自然科学基金 (20202 BABL214034)

作者简介: 吴荣, 男, 讲师, 博士, 主要从事光学测量与图像处理方面的研究。

通讯作者: 谢锋云, 男, 副教授, 硕士生导师, 博士, 主要从事先进检测技术、故障诊断与状态监测方面的研究。

the same depth of field range, so as to achieve high-precision measurement of the 3D profiles of multiple measured objects in different depth of field ranges. The effect of depth of field on 3D profile measurement results was verified using a standard six-step gypsum model. Meanwhile, the profiles of two standard table tennis within different depth of field ranges were measured using the traditional FPP system and the proposed FPP system. The table tennis radius as error results were obtained from the measured profile. The relative errors of the focused and the unfocused table tennis measured by the traditional FPP were 2.9% and 34.3%, respectively. And the corresponding measured errors by proposed mirror-assisted FPP were 2.7% and 5.3%, respectively. The results show that the proposed method can compensate the errors caused by the depth of field, and verifies the feasibility of the proposed method in 3D measurement with different depth of field ranges.

Key words: fringe projection; profile measurement; different depth of fields; mirror-assisted

0 引言

随着现代信息技术的快速发展,光学三维轮廓测量技术也逐步成熟。在众多光学三维轮廓测量技术中,条纹投影轮廓术(Fringe projection profilometry, FPP)因其具有非接触、速度快、成本低、高测量精度等优点而被广泛应用于缺陷检测、逆向工程、工业设计、智能制造等信息测量领域^[1-3]。

在采用相移技术的 FPP 中,为了实现快速、精确的三维轮廓逐像素测量,通常使用 $n(n=3,4,\dots)$ 步相移法^[4-5]。然而,对于不同景深的被测物体同时测量的情况下,例如,同时测量视场内的不同景深的多个静态被测物体,或者一次性测量大型复杂被测物体的某些特定的局部位置,或者同时测量一个物体的 360° 表面,由于摄像机有限景深的局限性,使得由摄像机和投影仪组成的传统 FPP 测量系统无法保证视场内的不同景深被测物体同时获得较高的测量精度。为解决这类问题,一些研究者对此进行了研究。例如, Qi Naiming 等提出了基于厚透镜模型的空间协同目标三维测量方法,该方法通过建立变焦视觉的空间机械臂协同目标测量系统和空间三维坐标测量模型、位姿计算模型,使得不同景深的物体能够同时清晰成像,从而获得多景深物体的精确测量^[6]。对于结构光的大型复杂物体测量,研究者从多个角度和位置对被测物进行了测量,并通过物体表面粘贴的标志点将多次测量数据转换到同一坐标系下,从而获得整个物体的三维测量^[7-8]。钟凯等将室内 GPS 光电跟踪定位技术与条纹投影三维轮廓测量术结合在一起,形成了一种组合式大尺寸空间精密测量方法^[9]。Tsujioka 等研制了一种采用光学空间调制器的三维形状自动测量条纹投影法,使用变焦相机扩大了测量范围,同

时也提高了测量精度^[10]。Yin Wei 等提出用两面反射镜组成的镜面辅助的方法实现物体的 360° 三维轮廓测量,解决了物体前后不同景深测量问题^[11]。尽管这些研究能在一定程度上解决视场内不同景深的被测物体测量精度问题,然而将这些技术运用到条纹投影测量中,则需要在实际测量时聚焦多次,同时也需要对摄像机和投影仪标定多次,才能精确获取聚焦不同区域的图像。而通过大量标志点测量局部区域,最终拼合成整体三维轮廓点云数据时,其测量精度会受影响。对于结合室内 GPS 的方法,需要使用激光发射器不断地向测量空间发射红外脉冲激光,还需要在结构光测量系统中固定能够接收红外激光信号的传感器和信号接收器,大大增加了设备的复杂度和成本。用两面相邻 120° 排列的反射镜组成的镜面辅助的全景 360° 三维轮廓测量系统也只能测量景深不大的小型被测物体表面。

文中提出了一种镜面辅助的 FPP 方法,该方法运用两面反射镜和两个棱镜,可将距离摄像机较近的被测物体转换到离摄像机较远的范围内进行测量,从而获得不同景深物体的同时聚焦,实现多景深的高精度测量。

1 条纹投影轮廓术测量原理

1.1 传统条纹投影轮廓术测量原理

在传统条纹投影轮廓术中,相移法由于对局部光照和物体表面反射率变化具有较强的鲁棒性而被广泛应用^[12]。目前使用较为广泛的相移测量方法主要有:三步相移法、四步相移法^[13]。文中在传统三步相移法的基础进行了改进,提出了多景深物体同时高精度测量方法。

在三步相移法中,首先由计算机生成一组光强呈

正弦分布的条纹图像并由投影仪向被测物体方向投射, 设定投影到被测物体的三张条纹图的相移量分别为 $0, 2\pi/3$ 和 $4\pi/3$, 则三幅相移图像在每个像素点 (x, y) 的强度可表示为:

$$I_0(x, y) = A(x, y) + B(x, y) \cos(\varphi(x, y)) \quad (1)$$

$$I_1(x, y) = A(x, y) + B(x, y) \cos(\varphi(x, y) - 2\pi/3) \quad (2)$$

$$I_2(x, y) = A(x, y) + B(x, y) \cos(\varphi(x, y) - 4\pi/3) \quad (3)$$

式中: $A(x, y)$ 为条纹图像的平均强度; $B(x, y)$ 为条纹调制度; $\varphi(x, y)$ 为待计算的包裹相位值。摄像机采集到的三幅图像为不同相移量的经被测物体表面直接调制而变形的条纹图像。

联合公式 (1)~(3) 可求得物体的包裹相位 $\varphi(x, y)$ ^[14]:

$$\varphi(x, y) = \arctan\left(\frac{\sqrt{3}(I_1 - I_2)}{2I_0 - I_1 - I_2}\right) \quad (4)$$

由公式 (4) 求得的包裹相位值域为 $[-\pi, \pi)$, 其相位分布是不连续的, 需要利用相位解包裹算法对获得的包裹相位进行解包裹, 得到绝对相位。包裹相位与绝对相位之间的关系可表示为:

$$\phi_h(x, y) = \varphi_h(x, y) + 2\pi k_h(x, y) \quad (5)$$

式中: $\phi_h(x, y)$ 为点 (x, y) 处的高频条纹的绝对相位; $\varphi_h(x, y)$ 为点 (x, y) 处的高频条纹的包裹相位; $k_h(x, y)$ 为点 (x, y) 处的高频条纹的条纹级次。

通过相位解包裹算法可得到条纹级次 $k_h(x, y)$, 如: 降级法。具体算法可表示为^[15]:

$$k_h(x, y) = \text{Round}\left[\frac{(\lambda_l/\lambda_h)\phi_l(x, y) - \phi_h(x, y)}{2\pi}\right] \quad (6)$$

式中: λ_h 为高频条纹的频率; λ_l 为低频条纹的频率; $\phi_h(x, y)$ 为点 (x, y) 处的高频条纹的绝对相位; $\phi_l(x, y)$ 为点 (x, y) 处的低频条纹的绝对相位; $\text{Round}[]$ 命令是就近取整。

同时, 利用棋盘格标定系统的内外参数, 结合以上得到的相位图重建出被测物体的三维点云数据。假设 (x_w, y_w, z_w) 为空间内任意点在世界坐标系下的三维坐标, (u, v) 为摄像机捕获的图像像素坐标。可得被测物体在世界坐标系下的三维坐标 (x_w, y_w, z_w) 与摄像机捕获的图像像素坐标 (u, v) 之间的关系为:

$$Z_c \begin{pmatrix} u \\ v \\ 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} s_x & 0 & u_0 & 0 \\ 0 & s_y & v_0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} R & T \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x_w \\ y_w \\ z_w \\ 1 \end{pmatrix} \quad (7)$$

式中: s_x 和 s_y 为像素坐标的尺度因子; u_0 和 v_0 分别为物

理坐标系与像素坐标系之间的偏移量; R 为空间内世界坐标系下的三维坐标到摄像机坐标系下的三维坐标的旋转矩阵; T 为空间内世界坐标系下的三维坐标到摄像机坐标系下的三维坐标的平移矩阵。

通过以上被测物体在世界坐标系下的三维坐标 (x_w, y_w, z_w) 与摄像机捕获的二维图像像素坐标 (u, v) 之间的关系, 就能够获得被测物体表面的三维轮廓点云数据, 从而实现被测物体的形貌重构^[16]。

1.2 基于镜面辅助的条纹投影测量原理

对于景深存在较大差异的物体同时测量的情况下, 在测量之前将摄像机与投影仪聚焦在距离最远的物体。与传统的 FPP 不同的是文中提出在测量系统中引入了两面光学反射镜和两个三棱镜, 通过调整镜片的距离使得距离摄像机较近的物体能够清晰成像, 从而一次性获得不同景深范围内的多个被测物体的同时清晰成像。

镜面辅助的 FPP 的光学结构如图 1 所示, 所构建的系统包括传统 FPP 三维测量系统和两面光学反射镜以及两个三棱镜。图中摄像机和投影仪聚焦在 A 物体, 假设 A 物体和摄像机之间的距离为 D , 假设 B 为离焦的物体并且和摄像机之间的距离为 $d_1 + d_3 + d_5$ 。

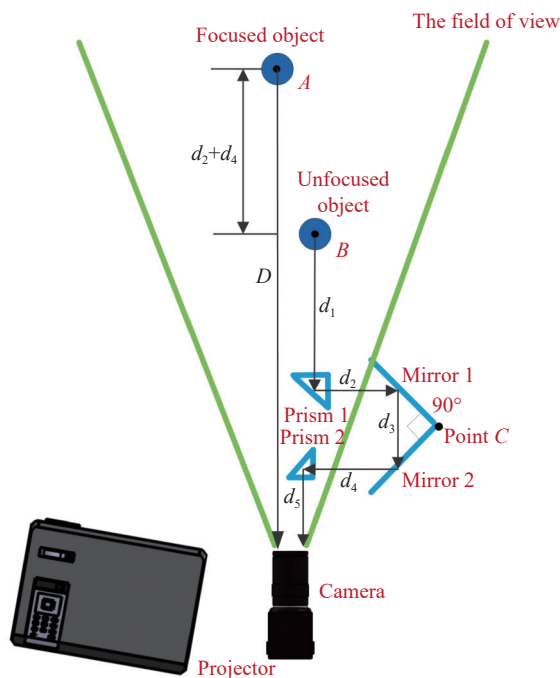


图 1 镜面辅助的 FPP 测量系统光学原理图

Fig.1 Optical schematic diagram of mirror-assisted FPP measurement system

两面光学反射镜 Mirror 1 和 Mirror 2 之间形成大约 90°的直角。三棱镜 Prism 1 的斜边大约与 Mirror 1 平行,三棱镜 Prism 2 的斜边大约与 Mirror 2 平行。因为摄像机的视场角随着距离的增大而增大,所以较小的 Prism 2 距离摄像机较近,较大的 Prism 1 距离摄像机较远,使得摄像机的视场不被完全挡住而能够捕获 A 物体的三维轮廓。调整 C 点与三棱镜的距离,可得摄像机清晰地捕获未聚焦的物体 B 的表面图像。

由图 1 可知,物体 A 的光直接到达摄像机的光路历程是 D 。物体 B 的光首先经 Prism 1 反射到达 Mirror 1 表面,其次由 Mirror 1 反射进入 Mirror 2,再次经 Mirror 2 反射进入到 Prism 2,最后经 Prism 2 反射进入摄像机,由此可知物体 B 的光到达摄像机的光程是 $d_1 + d_2 + d_3 + d_4 + d_5$ 。则可知物体 A 与物体 B 之间的光程是 $d_2 + d_4$,物体 B 与摄像机之间的光程是 $d_1 + d_3 + d_5$ 。因此物体 A 的光直接到达摄像机的光程和物体 B 的光经棱镜与反射镜反射后到摄像机的光程是近似相等的,它们之间的关系是:

$$D \approx d_1 + d_2 + d_3 + d_4 + d_5 \quad (8)$$

因此可知,该系统通过两面反射镜、两个三棱镜能够使得聚焦的物体 A 和未聚焦的物体 B 的光程近似相等,从而使得它们能够同时清晰地成像。对于不同景深的物体,可通过调整 d_2 和 d_4 就能够完成对视场内摄像机未聚焦的被测物体清晰成像,从而实现不同景深多物体的同时精确测量。上述描述的是针对两个不同景深的物体测量的情况,而对于视场内有 3 个或者以上的被测物体测量时,则需要相应的搭建更多的镜片辅助系统。

2 实验与结果

为了验证提出的基于镜面辅助的 FPP 测量方法用于不同景深范围内的多个被测物体测量的有效性、准确性和实用性,文中设计了两组实验:(1)利用传统 FPP 测量系统对 6 层石膏标准阶梯模型的三维轮廓测量;(2)传统 FPP 和提出的镜面辅助的 FPP 方法对不同景深范围内的两个标准乒乓球的三维轮廓同时测量对比实验。

2.1 实验装置

在实验 (1) 中,运用传统 FPP 测量系统对一个 90 mm×115 mm 的 6 层石膏标准阶梯模型的阶梯表面

进行测量,并比较每个阶梯平面的测量精度;在实验 (2) 中,分别采用传统 FPP 和镜面辅助的 FPP 测量系统同时测量不同景深范围内的两个标准乒乓球的表面,并将这两个乒乓球的拟合半径和标准半径进行比较,从而验证其测量精度。传统 FPP 测量系统和镜面辅助的 FPP 测量系统实验装置分别如图 2(a) 和图 2(b)

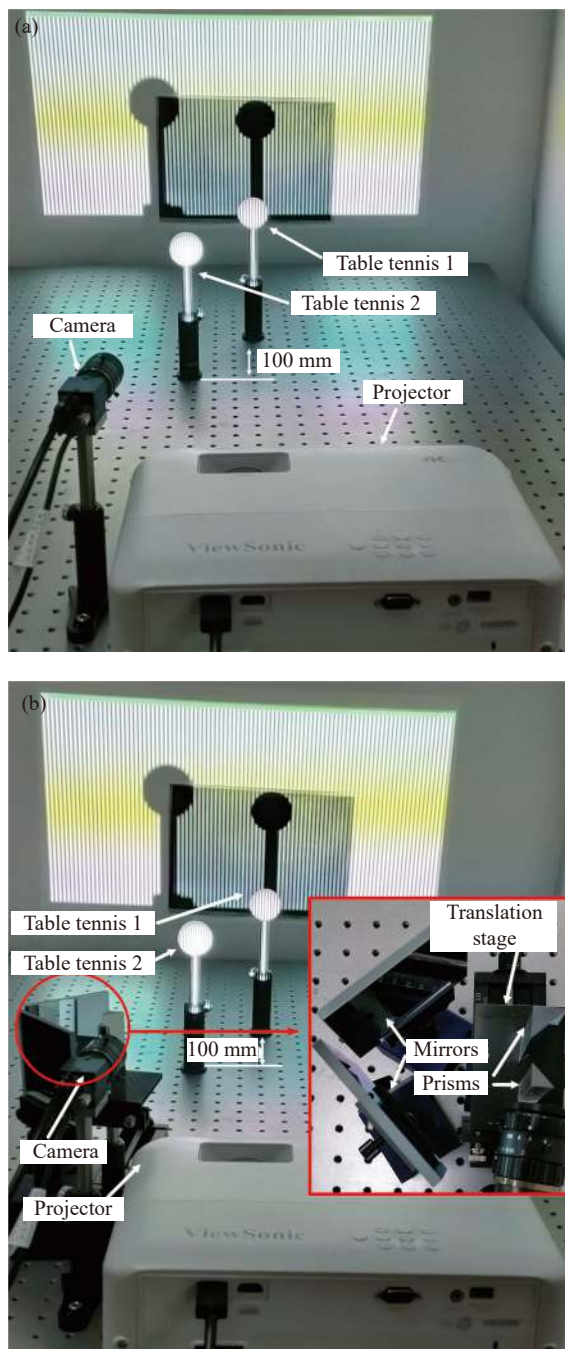


图 2 (a) 传统 FPP 测量系统;(b) 镜面辅助的 FPP 测量系统

Fig.2 (a) Traditional FPP measurement system ; (b) Mirror-assisted FPP measurement system

所示。测量系统主要包括分辨率为 3840×2160 dpi 的 DLP 投影仪 (ViewSonic PX701-4 K), 带有 25 mm 标准镜头的 CMOS 工业摄像机 (大恒图像 MER2-302-37 GM、分辨率为 2048×1536), 两片光学反射镜 (50 mm×50 mm), 两个三棱镜 (10 mm×10 mm, 15 mm×15 mm), 一台计算机。其中, 10 mm×10 mm 的三棱镜距离摄像机较近, 15 mm×15 mm 的三棱镜距离摄像机较远, 使得摄像机的视场不被棱镜完全挡住而能够捕获#1 号和#2 号乒乓球条纹图像。实验中相机的视场范围约为 170 mm×130 mm。

2.2 标准阶梯模型测量

为验证景深对传统 FPP 方法测量精度的影响, 用

传统 FPP 测量系统测量一个 90 mm×115 mm 的 6 层石膏标准阶梯模型的三维轮廓, 标准石膏阶梯模型实物如图 3(a) 所示, 阶梯模型每个台阶长宽高约为 90 mm×20 mm×15 mm。摄像机和投影仪均聚焦在阶梯最远平面 A 处, 摄像机捕获的 6 层石膏标准阶梯模型图像如图 3(b) 所示, 测量的三维轮廓如图 3(c) 所示。从 6 层石膏阶梯模型的三维点云数据中提取每个阶梯平面的部分三维点云数据, 每个平面的三维点云图如图 4 所示。

采用多元线性回归方法拟合阶梯模型的每一个阶梯平面, 由平面方程 $ax+by+cz+d=0$, 可得到阶梯平面 A~F 的拟合后的方程分别如下:

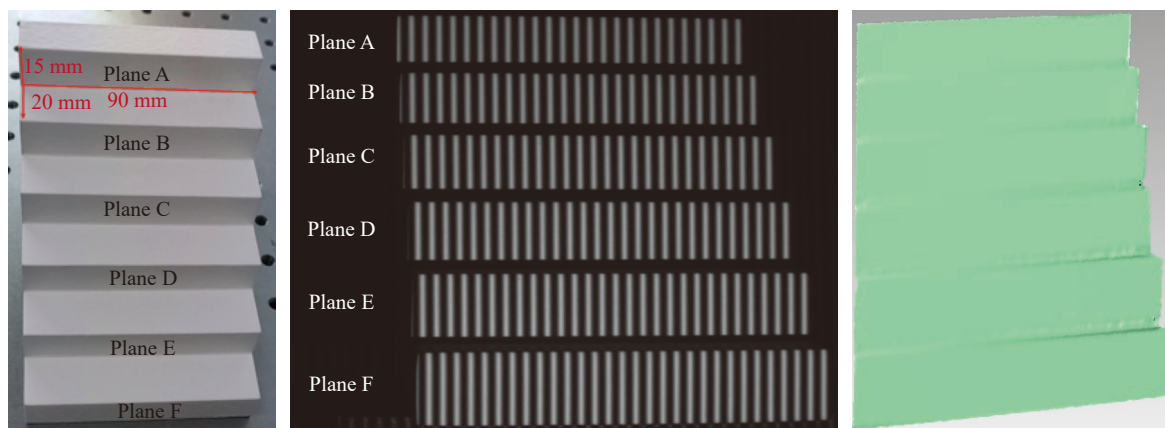


图 3 (a) 标准阶梯模型; (b) 标准阶梯条纹投影图像; (c) 标准阶梯的三维轮廓

Fig.3 (a) Standard step model; (b) Fringe projection image of the step model ; (c) 3D profile of the standard step model

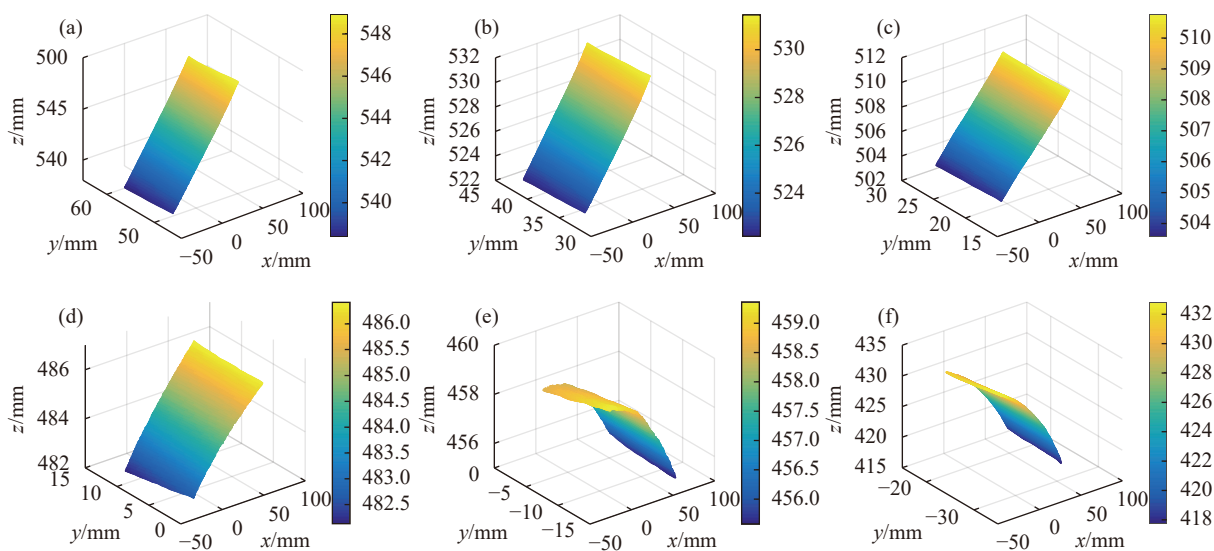


图 4 阶梯平面的三维点云图。(a) 阶梯平面 A; (b) 阶梯平面 B; (c) 阶梯平面 C; (d) 阶梯平面 D; (e) 阶梯平面 E; (f) 阶梯平面 F

Fig.4 3D point cloud of the step plane. (a) Step plane A; (b) Step plane B; (c) Step plane C; (d) Step plane D; (e) Step plane E; (f) Step plane F

$$\begin{aligned}
 0.120x - 0.038y - z + 544.497 &= 0 \\
 0.107x - 0.024y - z + 526.428 &= 0 \\
 0.082x - 0.013y - z + 506.418 &= 0 \\
 0.047x - 0.030y - z + 484.061 &= 0 \\
 -0.040x - 0.034y - z + 458.228 &= 0 \\
 -0.175x - 0.078y - z + 427.476 &= 0
 \end{aligned}
 \tag{9}$$

假设阶梯平面由 n 个点组成, 每个测得的点 $P_i (i = 1, 2, \dots, n)$ 的三维坐标为 (x_i, y_i, z_i) , 则可得到每个

点到拟合平面的距离 e_i :

$$e_i = \frac{|ax_i + by_i + cz_i + d|}{\sqrt{a^2 + b^2 + c^2}}
 \tag{10}$$

因此, 拟合误差可由集合 $error = [e_1, e_2, \dots, e_n]$ 表示, 误差的分布直方图如图 5 所示。

为进一步分析, 可由公式 (11) 求出每个平面的均方根误差 (Root mean square error, RMSE):

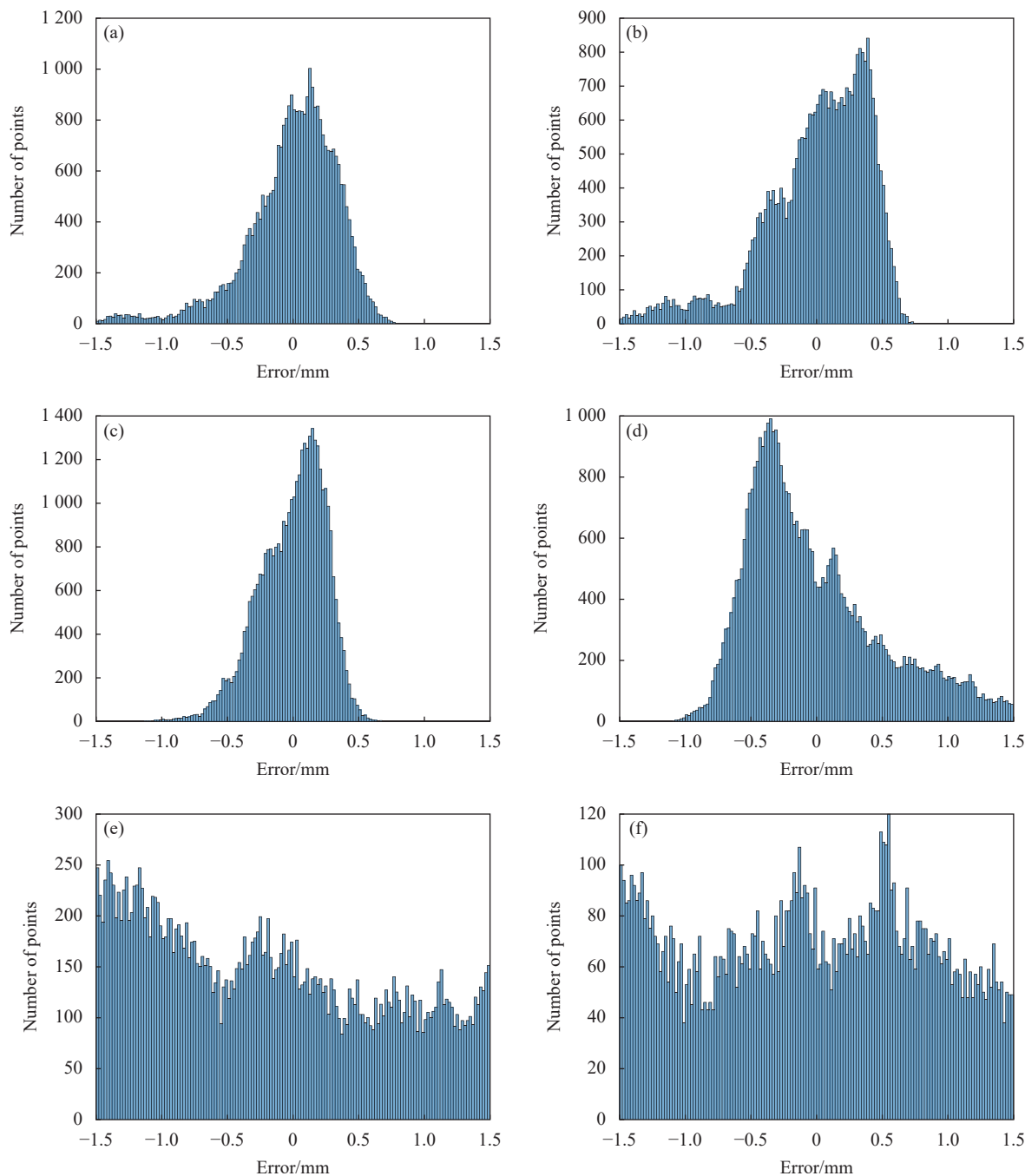


图 5 阶梯平面的误差分布直方图。(a) 阶梯平面 A; (b) 阶梯平面 B; (c) 阶梯平面 C; (d) 阶梯平面 D; (e) 阶梯平面 E; (f) 阶梯平面 F

Fig.5 Histogram of error distribution of step plane. (a) Step plane A; (b) Step plane B; (c) Step plane C; (d) Step plane D; (e) Step plane E; (f) Step plane F

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n e_i^2}{n}} \quad (11)$$

根据上述每个点的误差, 计算得到的阶梯平面 A~F 的均方根误差结果如图 6 所示。另外, 利用游标卡尺测量两相邻阶梯平面的平均深度作为真实深度, 由拟合方程计算平面中心点之前的距离作为测量深度, 其测量误差如表 1 所示, 其中“ A-B ”表示平面 A 与 B 之间深度, 其他以此类推。

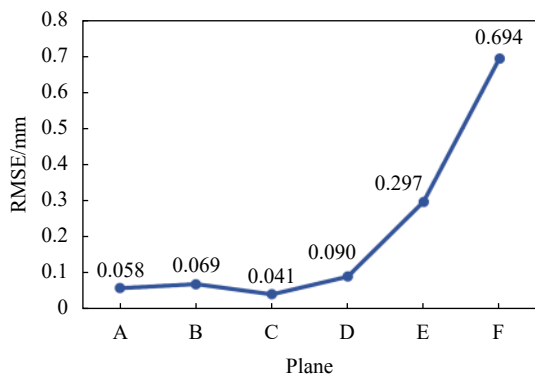


图 6 阶梯平面的拟合均方根误差

Fig.6 Fitted RMSE of step plane

表 1 阶梯平面的深度误差 (单位: mm)

Tab.1 Depth error of the step plane (Unit: mm)

| Plane difference | A-B | B-C | C-D | D-E | E-F |
|------------------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Actual depth | 18.70 | 20.10 | 19.26 | 20.36 | 18.08 |
| Measured depth | 17.32 | 19.84 | 23.33 | 27.52 | 33.88 |
| Absolute error | 1.38 | 0.26 | 4.07 | 7.16 | 15.80 |

2.3 标准乒乓球测量

为验证提出的 FPP 方法对不同景深物体测量的可行性, 将两个编号为 #1 号、#2 号的标准乒乓球分别放置在摄像机不同景深范围内, 分别采用传统 FPP 系统和镜面辅助的 FPP 系统分别同时测量两个标准乒乓球。利用游标卡尺 5 次测量的 #1 号和 #2 号乒乓球半径平均值分别为 20.01、19.99 mm。摄像机和投影仪均聚焦在 #1 号乒乓球处, 距离摄像机约 487.5 mm, #2 号乒乓球距离摄像机 387.5 mm, #1 号与 #2 号乒乓球的垂直距离约为 100 mm。

传统 FPP 系统摄像机捕获的两个标准乒乓球表面的条纹图像如图 7(a) 所示, 求解的绝对相位图如图 7(c) 所示, 其表面的三维轮廓测量结果如图 8(a) 所示, 通过拟合空间三维点云数据得到其拟合半径分别

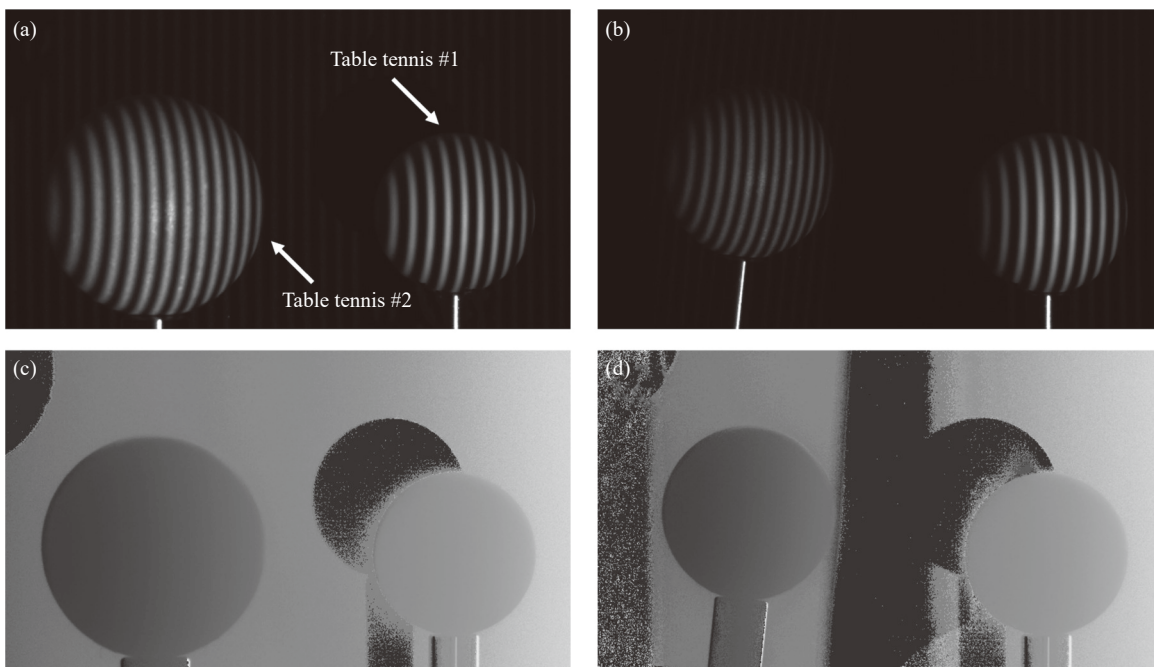


图 7 (a) 传统 FPP 系统捕获的条纹图像; (b) 镜面辅助的 FPP 系统捕获的条纹图像; (c) 传统 FPP 系统测量的绝对相位; (d) 镜面辅助的 FPP 系统测量的绝对相位

Fig.7 (a) Fringe image captured by the traditional FPP system; (b) Fringe image captured by the mirror-assisted FPP system; (c) Absolute phase map measured by the traditional FPP system; (d) Absolute phase map measured by the mirror-assisted FPP system

为 19.420 mm 和 13.155 mm, 与标准乒乓球半径的绝对误差和相对误差如表 2 所示。

在搭建镜面辅助的 FPP 测量系统前, 首先相机和投影仪均聚焦在距离系统最远处的#1 号乒乓球; 并将棋盘格在#1 号乒乓球附近任意摆放多次对测量系统进行标定; 标定结束后通过调整三棱镜、光学反射镜在摄像机前的放置位置使得摄像机能够同时清晰捕

获#1 号、#2 号乒乓球表面。摄像机捕获的两个标准乒乓球表面的条纹图像如图 7(b) 所示, 求解的绝对相位图如图 7(d) 所示, #1 号、#2 号乒乓球正表面的三维轮廓测量结果如图 8(b) 所示, 通过三维点云数据拟合得到的半径分别为 19.463 mm 和 18.937 mm, 与标准乒乓球半径的绝对误差和相对误差如表 2 所示。

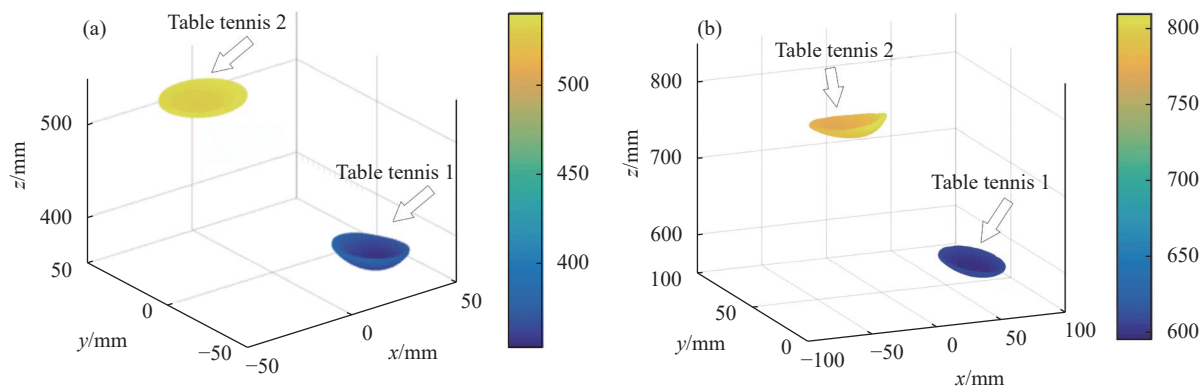


图 8 乒乓球表面三维轮廓测量结果。(a) 传统 FPP 系统; (b) 镜面辅助的 FPP 系统

Fig.8 Measurement results of 3D profile of table tennis surface. (a) Traditional FPP system; (b) Mirror-assisted FPP system

表 2 乒乓球的拟合半径及其误差

Tab.2 Fitting radius and error of the table tennis

| Table tennis | Fitting radius/mm | | Absolute error/mm | | Relative error | |
|--------------|-------------------|---------------------|-------------------|---------------------|-----------------|---------------------|
| | Traditional FPP | Mirror-assisted FPP | Traditional FPP | Mirror-assisted FPP | Traditional FPP | Mirror-assisted FPP |
| #1 | 19.420 | 19.463 | 0.59 | 0.547 | 2.9% | 2.7% |
| #2 | 13.155 | 18.937 | 6.835 | 1.053 | 34.3% | 5.3% |

3 分析与讨论

在阶梯模型的测量实验中, 通过图 3(c) 三维轮廓测量结果以及图 4 中每个阶梯平面的三维点云图, 可以看出阶梯平面 D、E 和 F 存在一定程度弯曲。进一步通过图 5 中每个阶梯平面的拟合误差分布直方图, 可以发现阶梯平面 A、B 和 C 的大部分三维点云的拟合误差在 -0.5~0.5 mm 之间, 并且拟合误差接近 0 的三维点云明显较多, 阶梯平面 D 的大部分三维点云的拟合误差分布在 -0.75~1.5 mm 之间, 阶梯平面 E 和 F 的三维点云的拟合误差在 -1.5~1.5 mm 之间均有分布, 且没有明显的规律^[17]。进一步根据图 6 的拟合均方根误差曲线, 比较发现从摄像机和投影仪聚焦的平面 A 处到阶梯平面 F, 阶梯平面的均方根误差随着离

焦程度增加而增加, 也即阶梯平面的平面拟合效果越来越差^[18]。综上可知, 被测物体的三维轮廓测量结果受测量系统景深的影响较大, 且测量误差随着离焦程度的增加而增加。

在标准乒乓球测量实验中, 传统 FPP 测量系统获得聚焦点处的#1 号乒乓球的测量半径与标准半径之间的绝对误差为 0.59 mm, 相对误差为 2.9%; 而#2 号乒乓球与标准半径之间的绝对误差 6.835 mm, 相对误差为 34.3%。由此可知, 未聚焦的#2 号乒乓球的误差明显增加, 且是不可接受的。

为提高未聚焦被测物的测量精度, 通过适当排列两面光学反射镜和两个三棱镜, 镜面辅助的 FPP 测量系统可以直接或者通过反射镜的反射和三棱镜的折

射间接捕获被测物体的三维轮廓图像,因此该系统相当于多个条纹投影三维轮廓测量系统。借助两面光学反射镜和两个三棱镜增加光路历程,可使得距离摄像机较近的未聚焦被测物清晰成像,从而实现未聚焦的物体和已聚焦物体的同时高精度测量。通过文中提出的镜面辅助的 FPP 测量系统同时测量不同景深范围内的两个乒乓球三维轮廓的实验可知,聚焦处的 #1 号乒乓球的测量半径与标准半径之间的绝对误差为 0.547 mm,相对误差为 2.7%;#2 号乒乓球与标准半径之间的绝对误差为 1.053 mm,相对误差为 5.3%。因此可知,提出的镜面辅助系统补偿了景深造成的误差,实现了不同景深物体的同时准确测量。当然,从测量数据可知,提出的方法虽然较大程度减少了未聚焦物体测量误差,但是与正常聚焦被测物对比,其测量精度仍然有待提高。这是由于在对未聚焦物体进行测量时,提出的系统仅仅考虑了相机离焦成像带来的影响,并未考虑投影仪离焦的影响^[19]。根据文中的测量结果可知,改善相机的成像可较大程度提高测量精度,使投影仪的离焦影响在可接受范围内。当然,为进一步提高系统测量精度,投影条纹离焦带来的误差仍需要进一步被改进。

另外,对于聚焦的#1号乒乓球,传统 FPP 测量系统和镜面辅助的 FPP 测量系统所测得的半径误差存在微小偏差,分别为 0.581 mm 和 0.538 mm,这是由于多次测量系统误差所致。

综上所述,建立的镜面辅助的 FPP 测量系统的有效性和准确性通过同时测量不同景深的#1号、#2号乒乓球的三维轮廓得到了验证。相比传统 FPP 测量系统,搭建的镜面辅助的 FPP 系统具有几个重要的优点:

(1) 成本低。镜面辅助的 FPP 测量系统只需要一个摄像机、一台投影仪、两面光学反射镜、两个三棱镜等构成,成本较低。

(2) 易于实现。由于只需要对单个条纹投影测量系统进行聚焦和标定,因此相对于传统的多次测量多个被测物体而言操作步骤大大简化。更重要的是,提出的系统使用通用条纹投影轮廓术算法,因此任何条纹投影三维测量系统均能使用该方法。

然而,该系统也存在一些局限性。由于摄像机镜头需要捕获两个单独的物体表面,这将导致图像的有效分辨率降低。此外,对于测量景深范围内的三个甚

至更多的被测物体时,需要在摄像机镜头前再错位搭建更多的镜面辅助系统。尽管存在这些缺点,但镜面辅助的 FPP 测量系统在三维测量方面仍具有较大潜力,例如在 360°光学测量中,可以改进 Yin Wei 等^[11]提出的 360°三维轮廓测量技术,有效提高其测量精度;也运用此类方法改进 Bin Chen 等^[20]建立的镜面辅助的全景立体 3D 系统测量精度,实现曲面 360°形貌和应变测量。

4 结 论

文中提出了一种低成本、有效的镜面辅助的 FPP 测量方法,该测量系统由两部分组成:传统 FPP 系统和镜面辅助部分,其中镜面辅助部分由两面光学反射镜、两个三棱镜组成。通过适当排列两面光学反射镜和两个三棱镜,镜面辅助的 FPP 测量方法能够一次性获得不同景深范围内的多个被测物体的清晰成像,并且可以直接或者通过反射镜和三棱镜的反射间接测量被测物体的三维轮廓。采用提出的 FPP 系统对相隔 100 mm 的两个标准乒乓球同时进行轮廓测量,摄像机聚焦点处和未聚焦的乒乓球的测量半径相对误差分别是 2.7%、5.3%。实验证明镜面辅助部分能够补偿景深造成的误差,较大程度提高系统测量精度,使投影仪的离焦影响在可接受范围内。该方法成本低、易于实现,在三维测量领域拥有较大的潜力。

参考文献:

- [1] Zhu Y J, Pan M L, Zhu L X, et al. Detection of mirror defects based on sector fringe reflection [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2020, 28(10): 2112-2121. (in Chinese)
- [2] Liu L, Xi D D, Cheng L, et al. Enhanced gray-code method for three-dimensional shape measurement [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2020, 49(11): 20200314. (in Chinese)
- [3] Shang W Q, Zhang W X, Wu Z, et al. Three-dimensional measurement system based on full-field heterodyne interferometry [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2019, 27(10): 2097-2104. (in Chinese)
- [4] Zuo C, Zhang X L, Hu Y, et al. Has 3D finally come of age?-An introduction to 3D structured-light sensor [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2020, 49(3): 0303001. (in Chinese)
- [5] Li Y, Zhang G H, Ma L H, et al. Review of dynamic three-dimensional surface imaging based on fringe projection [J].

- Infrared and Laser Engineering*, 2020, 49(3): 0303005. (in Chinese)
- [6] Qi N M, Xia Q, Guo Y B, et al. Pose measurement model of space cooperative target capture based on zoom vision system [J]. *Advances in Mechanical Engineering*, 2016, 8(7): 1-8. (in Chinese)
- [7] Reich C, Ritter R, Thesing J. 3-D shape measurement of complex objects by combining photogrammetry and fringe projection [J]. *Optical Engineering*, 2000, 39(1): 224-231.
- [8] Sitnik R, Kujawinska M, Woznicki J M. Digital fringe projection system for large-volume 360-deg shape measurement [J]. *Optical Engineering*, 2002, 41(2): 443-449.
- [9] Zhong K, Li Z W, Shi Y S, et al. Calibration algorithm of structure parameters in combined large-scale 3D metrology system [J]. *Journal of Tianjin University*, 2011, 44(5): 425-429. (in Chinese)
- [10] Tsujioka K, Liu J N, Uchida Y, et al. Three-dimensional shape measurement system using optical spatial modulator and zoom camera[C]// Proc of SPIE, 2003: 5253.
- [11] Yin W, Feng S J, Tao T Y, et al. Calibration method for panoramic 3D shape measurement with plane mirrors [J]. *Optics Express*, 2019, 27(25): 36538-36550.
- [12] Hu Y, Chen Q, Feng S, et al. Microscopic fringe projection profilometry: A review [J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2020, 135: 106192.
- [13] Wang J H, Yang Y X. Double N-step phase-shifting profilometry using color-encoded grating projection [J]. *Chinese Optics*, 2019, 12(3): 616-627. (in Chinese)
- [14] Tao T Y, Chen Q, Da J, et al. Real-time 3-D shape measurement with composite phase-shifting fringes and multi-view system [J]. *Optics Express*, 2016, 24(18): 20253-20269.
- [15] Zuo C, Huang L, Zhang M L, et al. Temporal phase unwrapping algorithms for fringe projection profilometry: A comparative review [J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2016, 85: 84-103.
- [16] Yang J B, Zhao J, Sun Q. Projector calibration based on cross ratio invariance [J]. *Chinese Optics*, 2021, 14(2): 320-328. (in Chinese)
- [17] Zhang L, Chen Q, Zuo C, et al. Real-time high dynamic range 3D measurement using fringe projection [J]. *Optics Express*, 2020, 28(17): 24363-24378.
- [18] Chen C, Yu J, Gao N, et al. High accuracy 3D calibration method of phase calculation-based fringe projection system by using LCD screen considering refraction error [J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2020, 126: 105870.
- [19] Rao G, Song L B, Zhang S, et al. Depth-driven variable-frequency sinusoidal fringe pattern for accuracy improvement in fringe projection profilometry [J]. *Optics Express*, 2018, 26(16): 19986-20008.
- [20] Chen B, Pan B. Mirror-assisted panoramic-digital image correlation for full-surface 360-deg deformation measurement [J]. *Measurement*, 2019, 132: 350-358.