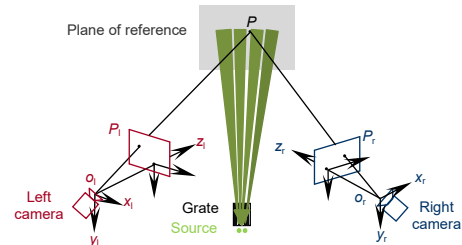




DOI: 10.12086/oe.2021.210298

采用 LD 的光源步进条纹投影 三维测量系统

应晓霖^{1,2}, 姚建云¹, 张晓松¹, 楚冬娅¹, 李勇^{1*}¹浙江师范大学信息光学研究所, 浙江 金华 321004;²浙江省光信息检测与显示技术重点实验室, 浙江 金华 321004

摘要: 在采用 LED 的光源步进法三维测量系统中, 由于 LED 发散角大, 在短距离内就达到较大的条纹投影面积, 造成系统工作距离短。另外大功率 LED 发光面尺寸大导致条纹对比度低, 投影高亮度、高对比度的条纹困难。为解决上述问题, 提出在光源步进法投影装置中采用激光二极管(LD)作为光源, 实现高亮度、高对比度相移条纹投影。采用该投影装置与双目摄像机设计了便携、高速的三维测量系统。首先利用改进的傅里叶变换轮廓术获取变形条纹相位及调制强度; 接着利用激光散斑的随机性, 在调制强度图中实现双目图像的粗匹配; 然后在粗匹配的基础上进行条纹相位展开, 利用相位实现精匹配; 最后获得待测物体三维形貌。利用设计的系统进行了实验验证。系统的测量体积为 360 mm×290 mm×100 mm, 采集的三维数据最多为 1280×1024 点。实现了 100 f/s 的三维形貌测量速度, 对平面的测量标准偏差为 0.19 mm, 对 5 个间隔距离为 1.00 mm 的平面进行了测量, 测量距离的平均误差为 0.05 mm。

关键词: 光学三维形貌测量; 条纹投影; 傅里叶变换轮廓术; 双目匹配

中图分类号: O439; TN206

文献标志码: A

应晓霖, 姚建云, 张晓松, 等. 采用 LD 的光源步进条纹投影三维测量系统[J]. 光电工程, 2021, 48(11): 210298

Ying X L, Yao J Y, Zhang X S, et al. Fringe projection based three-dimensional measurement system by the light-source-stepping method using LD[J]. *Opto-Electron Eng*, 2021, 48(11): 210298

Fringe projection based three-dimensional measurement system by the light-source-stepping method using LD

Ying Xiaolin^{1,2}, Yao Jianyun¹, Zhang Xiaosong¹, Chu Dongya¹, Li Yong^{1*}¹Institute of Information Optics, Zhejiang Normal University, Jinhua, Zhejiang 321004, China;²Key Laboratory of Optical Information Detecting and Display Technology of Zhejiang Province, Jinhua, Zhejiang 321004, China

Abstract: In the three-dimensional (3D) measurement system by the light-source-stepping method using LED, due to the large divergence angle of LED, the large fringe projection area can be achieved in a short distance, resulting in a short working distance of the system. In addition, the large luminous size of high-power LED leads to low fringe contrast, and it is difficult to project fringes with high brightness and high contrast. To solve the above problems, it is

收稿日期: 2021-09-14; 收到修改稿日期: 2021-10-26

基金项目: 浙江省自然科学基金资助项目(LY17F050002)

作者简介: 应晓霖(1997-), 女, 硕士研究生, 主要从事光学三维测量的研究。E-mail: 1104250111@qq.com

通信作者: 李勇(1972-), 男, 博士, 教授, 主要从事光学三维测量、全息三维显示方面的研究。E-mail: liyong@zjnu.cn

版权所有©2021 中国科学院光电技术研究所

proposed to use laser diode (LD) as the light source to realize high brightness and high contrast phase-shift fringe projection in the light-source-stepping projection device. A portable and high-speed three-dimensional measurement system is designed by using the projection device and binocular camera. Firstly, an improved Fourier transform profilometry is used to obtain the phase and modulation of deformed fringe. Secondly, using the randomness of laser speckle, the rough matching of the binocular image is realized in the modulation map. Then, the fringe phase is unwrapped on the basis of rough matching, and the phase is used to realize fine matching. Finally, the three-dimensional shape of the object to be measured is obtained. The experimental verification is carried out by using the designed system. The measurement volume of the system is 360 mm×290 mm×100 mm, and the maximum 3D point captured is 1280×1024 points. The 3D shape measurement speed of 100 f/s was achieved. The measurement standard deviation of the plane is 0.19 mm. Five planes with a distance of 1.00 mm were measured, and the average error of the measurement distance is 0.05 mm.

Keywords: optical three-dimensional shape measurement; fringe projection; Fourier transform profilometry; binocular stereo vision

1 引言

条纹投影三维测量技术在逆向工程、虚拟现实、文物保护及医疗等方面有广泛应用^[1-2]。条纹投影装置是基于该技术的测量系统中必不可少的部分^[3]。典型的投影装置采用激光干涉、光栅投影及数字光栅投影等方法实现。Srinivasan 等^[4]提出了一种采用激光剪切干涉的装置,由四分之一波片和可旋转的偏振片构成相移装置,实现相移条纹投影。Guan 等^[5]提出采用激光和声光调制器的结构光投影系统,理论上可以达到 200 MHz 的相移正弦条纹投影。这类装置对光路的稳定性要求较高。Su 等^[6]采用面积调制光栅实现高对比度正弦条纹投影,通过机械移动装置实现条纹相移。由于采用机械移动,不容易实现高速条纹投影。Heist 等^[7-9]提出了采用旋转光栅的高速投影装置。目前常见的条纹投影装置采用 LCD 或 DMD 数字投影仪^[10-12]。该类投影仪很好地解决了相移不准问题,其中用 DMD 的投影仪能够实现 2 kHz 以上的高速条纹投影^[13]。近几年,出现了采用 MEMS 微振镜的条纹投影装置^[14],激光作为光源,具有很大的景深。使用时无需调焦,但是目前投影速度不高,亮度较低。Fujigaki 等^[15]提出采用光源步进法实现高速三维测量。该方法采用多条线阵 LED 和罗琦光栅实现了 12 kHz 的高速相移条纹投影。该投影装置具有光学系统简单、体积小、成本低廉等优点。

常见 LED 发散角较大,通常要求光源步进法三维测量系统的工作距离较短,如文献^[16]中的最远工作距离仅为 155 mm。在工作距离远时投射面积太大造成光能浪费。另一方面,投影条纹的对比度受 LED 发光面尺寸及条纹周期约束,发光面尺寸越大条纹对比

度越低,条纹周期越小对比度越低。而在不少应用场合需要投影高密度、高亮度的条纹。目前高亮度 LED 的发光面尺寸较大,造成条纹对比度较低,限制了测量系统的应用。为解决这一问题本文提出采用激光二极管(LD)作为光源,制作光源步进投影装置。利用 LD 较小的发散角和发光面尺寸,获得高亮度、对比度的条纹投影装置。采用该投影装置与双目摄像机设计了便携、高速三维测量系统,给出了原理及实验验证。

2 理论推导

2.1 光源步进法

图 1 为光源步进法条纹投影装置结构剖面示意图,光栅与线光源垂直于纸面。其中 P_g 为光栅周期, P_s 为线光源之间的距离, a 是光源到光栅的距离, b 是光栅到被测面的距离, P_b 是距离光栅为 b 处的投影条纹周期, d_b 是距离光栅为 b 处的投影条纹位移距离。线光源发出的光将光栅投影到参考平面上形成光栅的阴影。线光源位置变化,阴影位置也随之变化。如图中光源 S_1 对光栅形成的阴影为绿色射线与参考平面相交的部分,光源 S_2 对光栅形成的阴影为红色射线与参考平面相交的部分。由几何关系可得距离光栅 b 处条纹移动距离与周期的比值 R_b 为

$$R_b = \frac{bP_s}{(a+b)P_g} \quad (1)$$

在光栅周期比较大时,可以忽略光的衍射效应。当光源是理想的线光源时,采用罗琦光栅投影,能够得到对比度最高的条纹,但是条纹的正弦性也最差。实际光源都有一定的宽度,光栅在参考平面上的投影如图 2 所示。此时参考平面上的条纹可以表示为

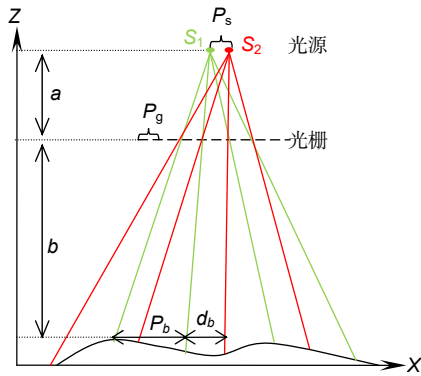


图 1 光源步进法投影相移条纹
Fig. 1 Phase-shifted fringe projection by the light-source-stepping method

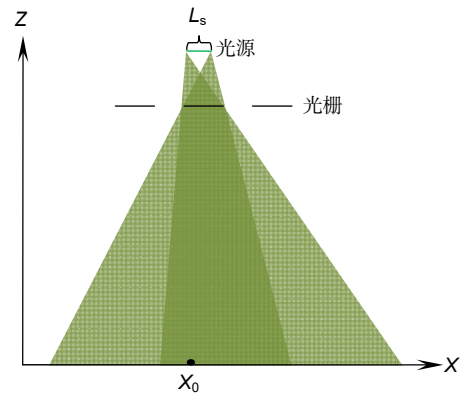


图 2 光源尺寸对阴影的影响
Fig. 2 Influence of the light source size on shadow

$$\hat{g}(x) = \int_{-L_s/2}^{L_s/2} g(x-x_0) dx_0 = g(x) * \text{Rect}\left(\frac{ax}{bL_s}\right), \quad (2)$$

式中： $g(x)$ 是理想线光源照明时参考平面上的条纹， $\text{Rect}()$ 是矩形窗函数， L_s 是线光源宽度， $*$ 表示卷积运算。矩形窗函数相当于低通滤波器，式(2)表示了对信号的低通滤波。窗越宽，滤波器的通频带越窄，能量越往零频集中，对同一频率的信号衰减越大。当采用有一定宽度的线光源照明光栅时，参考平面上条纹比理想线光源照明模糊(条纹正弦性变好)，对比度降低。光源越宽，条纹对比度越低。同时条纹越密，对比度也越低。目前常见高亮度 LED 的发光面尺寸较大，在要求投影装置尺寸小、条纹密度高、不外加投影光学系统的情况下无法实现高亮度、对比度条纹投影。为了解决这个问题，采用了发光面尺寸和发散角小的 LD 作为光源。

2.2 改进的傅里叶变换轮廓术

由式(1)可知， R_b 不是固定不变的，会随着 b 变化而变化，即不同深度对应的相移量不同。这一比率的变化将导致使用相位测量轮廓术时，由于相移不准确而产生较大误差。测量深度范围大时，即使采用全局查找表依旧存在较大误差。原始设计的三维测量系统测量深度范围较小。为扩展测量深度范围，本文采用一种改进的傅里叶变换轮廓术^[17]。

条纹图加减运算不改变条纹的频率，滤波后只留下基频分量。这里仅用基频进行分析，摄像机拍摄的两幅具有一定相移的变形条纹图光强可表示为

$$I_1(x, y) = a(x, y) + b(x, y) \cos[2\pi f_0 x + \Delta\phi(x, y)] \quad (3)$$

$$I_2(x, y) = a(x, y) + b(x, y) \cos[2\pi f_0 x + \Delta\phi(x, y) + \delta(z)] \quad (4)$$

式中： f_0 为条纹频率， $\Delta\phi(x, y)$ 为受面形调制的相位， $\delta(z)$ 为条纹相移量。将式(4)减去式(3)可得：

$$\begin{aligned} I(x, y) &= b(x, y) \{ \cos[2\pi f_0 x + \Delta\phi(x, y) + \delta(z)] \\ &\quad - \cos[2\pi f_0 x + \Delta\phi(x, y)] \} \\ &= b(x, y) \{ [1 - \cos\delta(z)] \cos[2\pi f_0 x + \Delta\phi(x, y)] \\ &\quad - \sin\delta(z) \sin[2\pi f_0 x + \Delta\phi(x, y)] \} \\ &= \sqrt{2 - 2\cos\delta(z)} b(x, y) \cdot \cos[2\pi f_0 x + \Delta\phi(x, y) + \alpha(z)] \quad (5) \end{aligned}$$

式中：

$$\alpha(z) = \arctan\left[\frac{\sin\delta(z)}{1 - \cos\delta(z)}\right]$$

对式(5)进行傅里叶变换、滤波，然后再逆傅里叶变换，最后求解得到截断相位和调制度。

由式(5)可知，当 $\delta(z) \in [0, \pi]$ 时， $I(x, y)$ 的幅值随着 $\delta(z)$ 的增大而增大，并在 $\delta(z) = \pi$ 时，取得最大值。当 $\delta(z) \in (\pi, 2\pi)$ 时，则情况相反。当 $\delta(z) = 0$ 或 2π 时， $I(x, y)$ 的幅值达到最小为零。因此，投影系统设计时，参考平面上的相移量取 π 比较合适。在系统的测量范围内相移量尽量靠近 π ，不能出现为周期整数倍情况。

2.3 条纹投影双目三维测量

图 3 是条纹投影双目三维测量系统结构示意图。投影装置投射条纹到被测物体表面，左、右摄像机拍摄被物体表面形貌调制的变形条纹。对拍摄的图像进行极线校正后，以条纹相位为特征，以其中一个相机为基准，进行图像对应点匹配得到另一个相机的图像在基准图像中的匹配点，获得视差图。在得到视差图

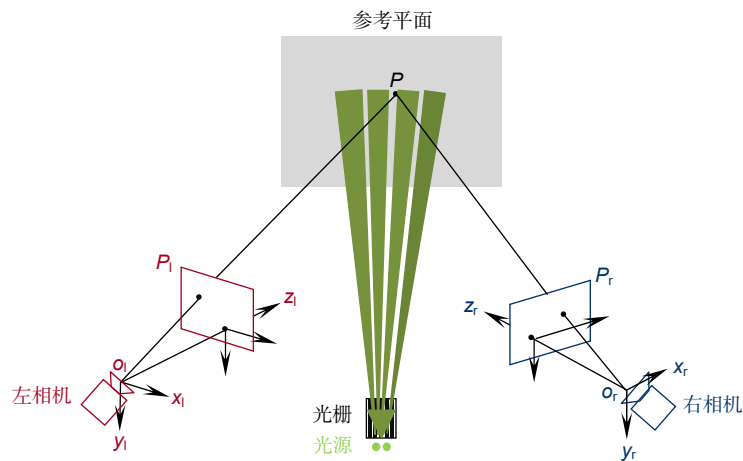


图 3 三维测量系统结构示意图
Fig. 3 Schematic diagram of the 3D measurement system

后, 通过式(6)计算物体表面三维形貌。

$$\begin{cases} Z = \frac{f \cdot B}{D + d} \\ X = \frac{u - u_0}{f} Z \\ Y = \frac{v - v_0}{f} Z \end{cases}, \quad (6)$$

式中: f 为相机焦距, B 为两相机光心距离, 即基线距, D 为视差, d 为两相机主点的差, (u_0, v_0) 为目标相机主点坐标, (u, v) 为目标图像中点的坐标。

由于条纹相位获取过程中采用了反正切运算, 得到的相位被截断在 $[-\pi, \pi)$ 区间内。以截断相位进行对应点匹配会存在多个匹配点问题, 通常需要对条纹进行展开。条纹展开的方法有时间相位展开法和空间相位展开法。这里提出多起始点空间相位展开法。由于本文采用的 LD 是高度相干光源, 它在散射体表面的

漫反射或通过一个透明散射体(如毛玻璃)时, 在散射表面或附近的光场中可以观察到一种无规则随机分布的激光散斑。因此采用 LD 作为光源在提高投影条纹对比度的同时也引入了激光照明固有的散斑问题。在这里利用散斑的随机性, 将调制度图中的散斑作为特征用于双目系统的对应点粗匹配。针对采用散斑匹配的对点存在误匹配问题, 利用左右视差一致性检测、连通区域检测及调制度阈值进行错误点剔除。

图 4 为对应点匹配示意图, 以左图像为基准, 从右图像中取出规定尺寸的子图像, 在左图像中以对应极线为垂直方向中心, 计算这两个子图的相似性。在极线上从左到右搜索, 找出相似性最大的位置, 当其相似性大于阈值时, 认为这两个区域匹配, 区域中心为匹配点。依次逐个找出匹配点, 得到视差图。通过实验, 发现归一化灰度互相关度(normalized cross correlation, NCC)最适合散斑特征的对点匹配。相

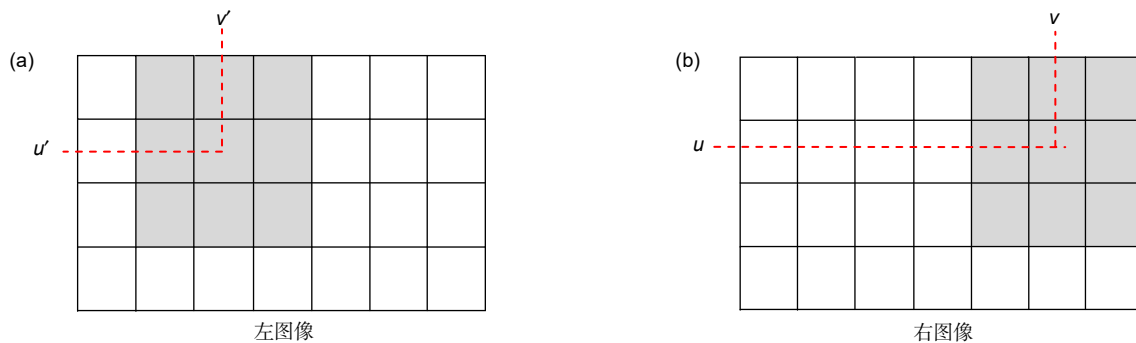


图 4 对应点匹配示意图
Fig. 4 Corresponding point matching diagram

似度 N 的计算公式如下:

$$N(u, v) = \frac{\sum_{v'=0}^{n-1} \sum_{u'=0}^{m-1} T(u', v') I(u, v)}{\sqrt{\sum_{v'=0}^{n-1} \sum_{u'=0}^{m-1} T(u', v')^2 \sum_{v=0}^{n-1} \sum_{u=0}^{m-1} I(u, v)^2}}, \quad (7)$$

式中: $N(u, v)$ 是 (u, v) 点的相似度, $I(u, v)$ 为目标图像 (u, v) 处的灰度值, $T(u', v')$ 为基准图像 (u', v') 处的灰度值。

经过调制度匹配后, 得到的是精度较低的视差图, 并且匹配耗时长。这里在调制度图中设置阈值进行图像分割, 得到条纹质量好的区域, 并在每个区域内条纹调制度最高点附近邻域中进行对应点匹配。以其中可靠度高的匹配点为起始点, 采用可靠度导向快速相位展开算法^[18]进行相位展开, 利用展开相位进行对应点匹配, 获得亚像素级别的视差图。最后利用式(6)计算物体表面三维坐标。

2.4 测量流程

综上所述, 本文所提方法的测量流程如下:

- 1) 利用光源步进法投影相移条纹并拍摄变形条纹图;
- 2) 将有相移的两幅变形条纹图相减, 做傅里叶变换、滤波及逆傅里叶变换, 最后获得截断相位和调制度;
- 3) 在调制度图中进行图像分割, 然后在每个非连通区域内在条纹调制度最高点附近邻域中进行对应点匹配;
- 4) 选取可靠度高的匹配点, 利用可靠度导向快速相位展开算法对截断相位进行展开;
- 5) 利用展开相位进行精匹配, 得到高精度的视差图;
- 6) 利用视差进行三维重建。

3 实验

为验证方法的可行性, 根据图 3 搭建了如图 5 所示的实验系统。相机采用 1280×1024 像素的工业相机, 镜头焦距为 12 mm。拍摄速度为 200 f/s, 每两帧条纹图获得一帧三维数据, 因此测量系统的三维记录速度为 100 f/s。采用两条 LD 线阵和光栅搭建了光源步进投影装置, 光源与光栅之间的距离为 48 mm, 线阵间的距离为 16.725 mm, 系统工作距离为 460 mm~560 mm, 系统测量体积为 360 mm×290 mm×100 mm, 参考平面上光栅周期约为 5.6 mm。采用嵌入式微控制器设计了 LD 开关电路控制 LD 按要求顺序发光, 同时提供同步信号控制摄像机同步曝光。对应点粗匹配窗口为 91 pixel×91 pixel; 精匹配窗口为 3 pixel×3 pixel。

3.1 投影系统性能测试

选用两线对/毫米和四线对/毫米的光栅, 分别采用 LD 与 LED 作为光源进行对比实验。分别采用 3 个 200 mW、发光面尺寸为 40 μm×15 μm 的 LD 光源和 20 个 60 mW、发光面尺寸为 110 μm×115 μm 的规格为 0201 的 LED 组成 1 个线阵光源。光栅到参考平面距离为 510 mm。当曝光时间超过 1 ms 时, 采用 LD 的系统拍摄的条纹出现饱和。而采用 LED 的系统几乎拍摄不到条纹。在拍摄的条纹亮度接近时, 采用 LD 系统的曝光时间为 1 ms, 而采用 LED 系统的曝光时间为 15 ms。

首先比较了不同光源投影的条纹对比度。在采用两线对/毫米的光栅时, 对拍摄条纹进行计算得到采用 LED 投影的条纹对比度为 0.395, 而采用 LD 投影的条纹对比度为 0.982。在采用四线对/毫米的光栅时采用 LED 投影的条纹对比度为 0, 而采用 LD 投影的条纹对比度为 0.969。

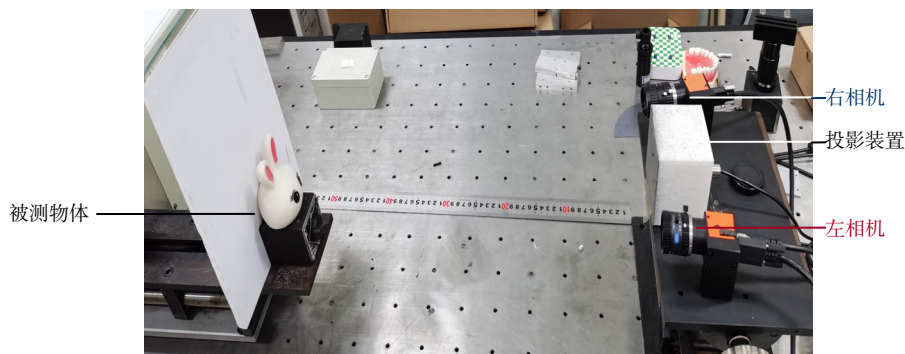


图 5 测量系统实物图

Fig. 5 Physical diagram of the measurement system

接着比较了不同光源投影条纹的正弦性。由于采用 LED 已无法投影四线对/毫米的光栅, 这里只对两线对/毫米的光栅投影进行了比较。两幅条纹的频谱如图 6 所示, 其中图 6(a)为采用 LED 投影的条纹频谱, 图 6(b)为采用 LD 投影的条纹频谱。为突出高次谐波, 图中去除了零级。由实验结果可知, 采用 LD 投影的条纹正弦性差于采用 LED 投影的条纹, 但前者条纹对比度远大于后者。另外, 采用 LD 作为光源可以采用频率更高的光栅, 高次谐波与基频的距离更远, 在采用改进的傅里叶变换轮廓术时滤波器尺寸可以选得更大, 有利于提高测量系统的精度。

3.2 精度评价

为了评估所提方法的精度, 对标准平面进行了实验。将标准平面装在电控平移台上移动, 测量 5 个间隔距离为 1.00 mm 的平面。图 7 为其中一个标准平面的三维重建结果。对测量结果进行平面拟合, 拟合的

标准偏差为 0.19 mm。表 1 为标准平面间距离的测量结果, 测量的最大误差为 0.1 mm。

3.3 复杂场景三维测量

为验证提出方法的普适性, 对复杂场景进行了测量。首先测量了橡胶人头模型。图 8 为橡胶人头模型测量结果, 其中图 8(a)是左右相机拍摄的变形条纹图; 图 8(b)和 8(c)是对应的调制度图和截断相位图; 图 8(d)和 8(e)是粗匹配结果和精匹配结果; 图 8(f)为恢复的三维形貌。

接着测量了一个由平面和兔头模型构成的含孤立物体场景。图 9(a)为场景照片, 图 9(b)为其三维重建结果。

4 数据分析

由实验结果可以看出, 采用激光散斑匹配的视差较粗糙。采用条纹相位进行匹配后, 视差精度明显提

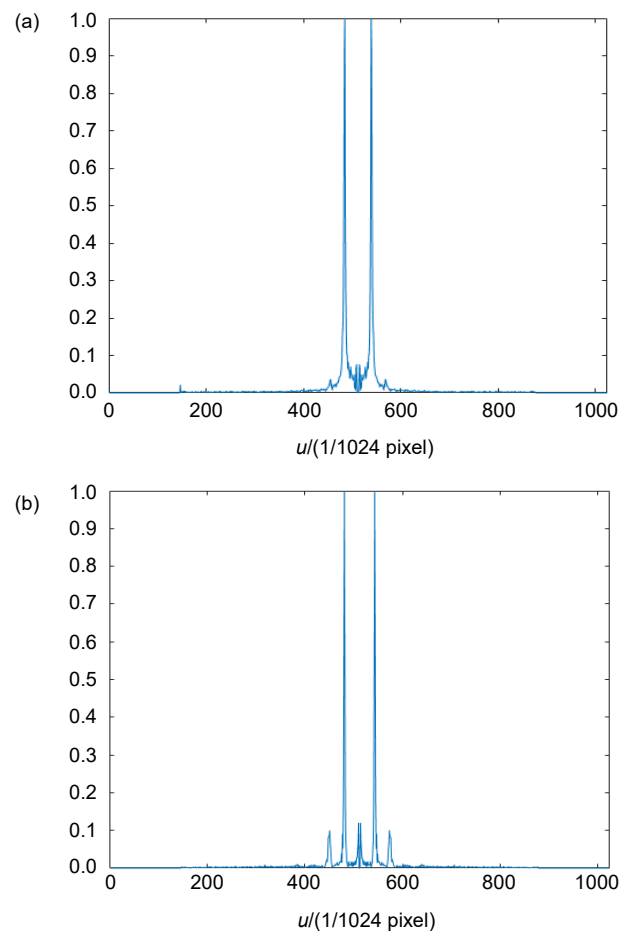


图 6 采用不同光源投影的条纹频谱对比。(a) LED 光源投影的条纹频谱; (b) LD 光源投影的条纹频谱

Fig. 6 Comparison of fringe spectrum projected with different light sources.
(a) Fringe spectrum projected with LED; (b) Fringe spectrum projected with LD

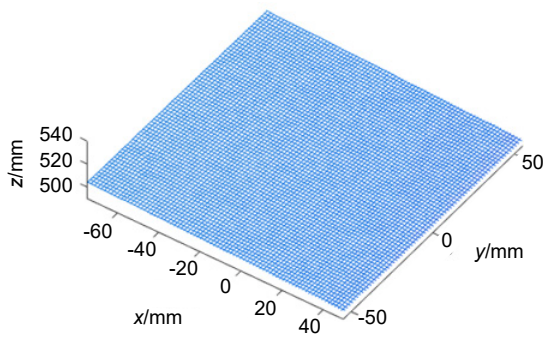


图 7 标准平面三维重建结果
Fig. 7 Reconstructed 3D standard plane

表 1 平面移动距离测量结果

Table 1 Measurement results of plan distance

实际距离/mm	测量结果/mm
1.00	1.10
1.00	0.90
1.00	1.00
1.00	1.00

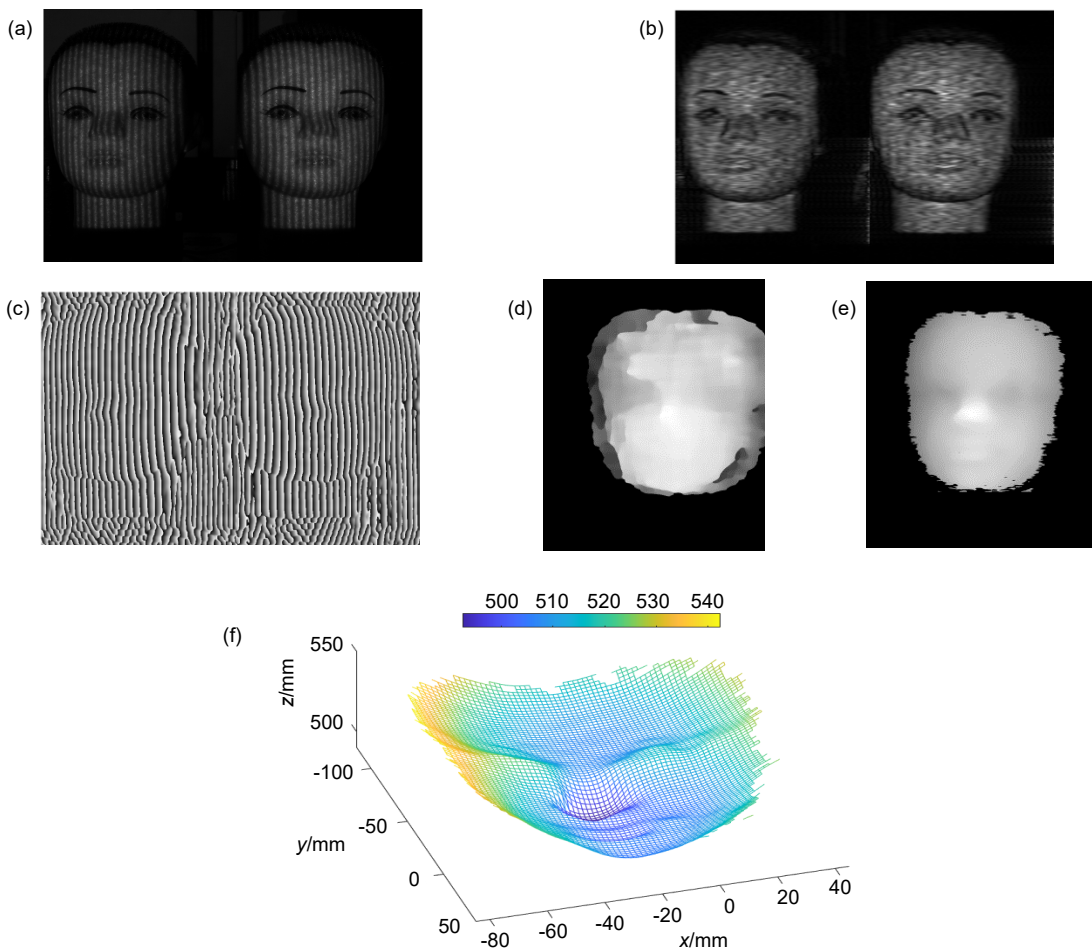


图 8 橡胶人头模型测量结果。

(a) 变形条纹图; (b) 调制度图; (c) 截断相位图; (d) 粗匹配结果图; (e) 精匹配结果图; (f) 三维重建结果

Fig. 8 Measured results of a model rubber head.

(a) Deformed fringe; (b) Modulation; (c) Wrapped phase; (d) Rough matching result;
(e) Fine matching result; (f) Result of 3D reconstruction

高。在包含多个孤立物体的场景测量时, 只要每个孤立区域存在可靠的粗匹配点, 就能够进行正确的三维重建。采用提出的方法, 测量系统的工作距离及深度

测量范围明显增加。实验中, 散斑明显, 对应点匹配的可靠度较高, 但是也导致了测量误差增加。后续研究需要考虑如何平衡匹配可靠度与误差之间的关系。

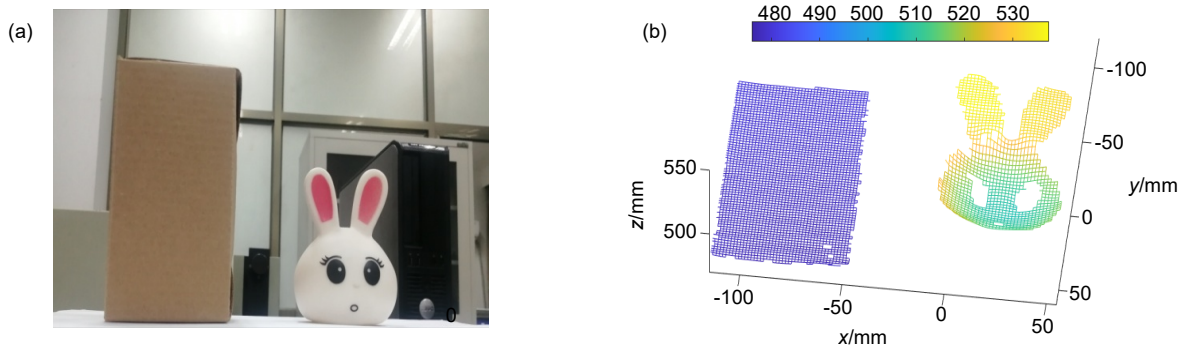


图9 孤立物体测量结果。(a) 场景照片; (b) 三维重建结果

Fig. 9 Measured results of isolated objects. (a) Photo of the scene; (b) Results of 3D reconstruction

5 结论

本文对光源步进法条纹投影装置中条纹对比度与光源发光面尺寸及条纹周期之间的关系进行了分析, 得出结论: 要得到高对比投影条纹需要发光面尺寸小的光源。提出采用 LD 作为光源的光源步进法条纹投影装置。由于 LD 发散角小, 能够实现工作距离远、高密度的相移条纹投影, 同时利用 LD 照明的固有属性一散斑现象, 设计主动双目测量系统同步同时获取散斑及条纹。利用散斑进行对应点粗匹配, 解决条纹相位展开问题。进一步结合改进的傅里叶变换轮廓术, 明显增加了系统的深度测量范围。实验结果验证了所提方法的可行性, 对含孤立物体的场景测量有较好的鲁棒性。

参考文献

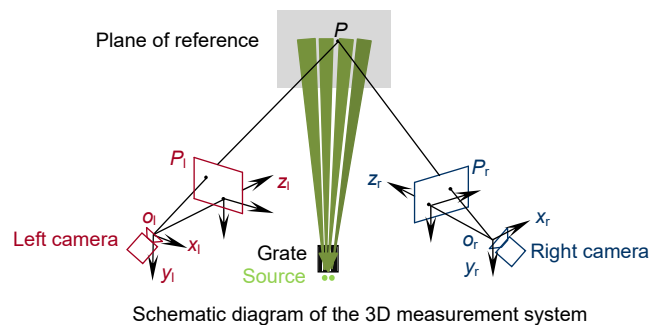
- [1] Gen J. Structured-light 3D surface imaging: a tutorial[J]. *Adv Opt Photon*, 2011, **3**(2): 128–160.
- [2] Su X Y, Zhang Q C, Chen W J. Three-dimensional imaging based on structured illumination[J]. *Chin J Lasers*, 2014, **41**(2): 0209001.
苏显渝, 张启灿, 陈文静. 结构光三维成像技术[J]. *中国激光*, 2014, **41**(2): 0209001.
- [3] Li Y, Zhang G H, Ma L H, et al. Review of dynamic three-dimensional surface imaging based on fringe projection[J]. *Infrared Laser Eng*, 2020, **49**(3): 0303005.
李勇, 张广汇, 马利红, 等. 条纹投影动态三维表面成像技术综述[J]. *红外与激光工程*, 2020, **49**(3): 0303005.
- [4] Srinivasan V, Liu H C, Halioua M. Automated phase-measuring profilometry of 3-D diffuse objects[J]. *Appl Opt*, 1984, **23**(18): 3105–3108.
- [5] Guan Y J, Yin Y K, Li A M, et al. Dynamic 3D imaging based on acousto-optic heterodyne fringe interferometry[J]. *Opt Lett*, 2014, **39**(12): 3678–3681.
- [6] Xian T, Su X Y. Area modulation grating for sinusoidal structure illumination on phase-measuring profilometry[J]. *Appl Opt*, 2001, **40**(8): 1201–1206.
- [7] Heist S, Mann A, Kühmstedt P, et al. Array projection of aperiodic sinusoidal fringes for high-speed three-dimensional shape measurement[J]. *Opt Eng*, 2014, **53**(11): 112208.
- [8] Hyun J S, Chiu G T C, Zhang S. High-speed and high-accuracy 3D surface measurement using a mechanical projector[J]. *Opt Express*, 2018, **26**(2): 1474–1487.
- [9] Zhang H H, Li Y, Zhang Q C. Dynamic 3D shape measurement method based on rotating grating projection[J]. *Acta Opt Sin*, 2021, **41**(23): 2312005.
张海花, 李勇, 张启灿. 基于旋转光栅投影的动态三维面形测量方法[J]. *光学学报*, 2021, **41**(23): 2312005.
- [10] Li Y, Zhao C F, Qian Y X, et al. High-speed and dense three-dimensional surface acquisition using defocused binary patterns for spatially isolated objects[J]. *Opt Express*, 2010, **18**(21): 21628–21635.
- [11] Xing S P, Cai N, Lin B. High-quality 3D shape measurement based on ant colony phase jitter optimization[J]. *Opto-Electron Eng*, 2021, **48**(7): 210114.
邢生平, 蔡宁, 林斌. 基于蚁群相位抖动优化的高质量三维形貌测量[J]. *光电工程*, 2021, **48**(7): 210114.
- [12] Lu S J, Li Y, Wang H, et al. High-speed and dense 3D shape capture of scene consisting of spatially isolated objects[J]. *Opto-Electron Eng*, 2012, **39**(1): 34–39.
卢世江, 李勇, 王辉, 等. 含孤立物体场景的高速、高密度三维面形采集[J]. *光电工程*, 2012, **39**(1): 34–39.
- [13] Zhang S. High-speed 3D shape measurement with structured light methods: a review[J]. *Opt Lasers Eng*, 2018, **106**: 119–131.
- [14] Feng C, Chen W Y, Yang H. A generation method of high accuracy sinusoidal grating based on MEMS micro-mirror[J]. *Comput Digit Eng*, 2018, **46**(2): 367–370, 401.
冯晨, 陈文艺, 杨辉. 基于 MEMS 微振镜的高精度正弦光栅产生方法[J]. *计算机与数字工程*, 2018, **46**(2): 367–370, 401.
- [15] Fujigaki M, Oura Y, Asai D, et al. High-speed height measurement by a light-source-stepping method using a linear LED array[J]. *Opt Express*, 2013, **21**(20): 23169–23180.
- [16] Fujigaki M, Sakaguchi T, Murata Y. Development of a compact 3D shape measurement unit using the light-source-stepping method[J]. *Opt Lasers Eng*, 2016, **85**: 9–17.
- [17] Jiang Y T, Li Y, Huang K, et al. New calibration approach for 3D measurement system based on the light-source-stepping method[J]. *Proc SPIE*, 2019, **11189**: 111891J.
- [18] Li Y, Su X Y. Fast algorithm for reliability-guided phase unwrapping[J]. *Opto-Electron Eng*, 2005, **32**(11): 76–79.
李勇, 苏显渝. 用于可靠性导向相位展开的快速算法[J]. *光电工程*, 2005, **32**(11): 76–79.

Fringe projection based three-dimensional measurement system by the light-source-stepping method using LD

Ying Xiaolin^{1,2}, Yao Jianyun¹, Zhang Xiaosong¹, Chu Dongya¹, Li Yong^{1*}

¹Institute of Information Optics, Zhejiang Normal University, Jinhua, Zhejiang 321004, China;

²Key Laboratory of Optical Information Detecting and Display Technology of Zhejiang Province, Jinhua, Zhejiang 321004, China



Overview: Fringe projection based three-dimensional measurement technology has been widely used in reverse engineering, cultural relic protection, medical image, virtual reality, and so on. The fringe projection device (projector) is an essential part of the measurement system based on this technology. The common high-speed projector is expensive and complicated. Fujigaki proposed a light-source-stepping projector using a linear LED array and Ronchi grating. The projector is simple, smaller in size, and cheaper in price. However, a large light-emitting area of high-power LED leads to lower contrast of the fringe, especially the high-density fringe. The large divergence angle of LED leads to the short working distance of the projector. On other hand, the light-emitting area and divergence angle of laser diode (LD) are small. To solve the problems of LED-based projectors, a linear LD array is used as the light source to project phase-shifted fringe with higher brightness and higher contrast. Because LD is a coherent light source, a speckle problem is introduced while improving fringe contrast. Using the randomness of speckle, the speckle in the modulation image is used as a feature for rough matching of homologous points in a binocular system. In the origin system, PMP is used for phase measurement. The measured depth range of the system is small because the phase shift is different at different depths. An improved Fourier transform profilometry is proposed to extend the depth range. A portable and high-speed three-dimensional measurement system is designed by using the projector and binocular camera. The measurement process is as follows. 1) The light-source-stepping method is used to project phase-shifted fringes and the camera is used to take deformation fringes. 2) The two deformed fringe patterns with phase shift are subtracted. Then, Fourier transform, filtering, and inverse Fourier transform are performed successively. Finally, the wrapped phase and modulation are obtained. 3) The modulation image is segmented, and then the homologous points are found by feature matching in the neighborhood near the point with the highest modulation in each non-connected region. 4) The matching points with high reliability are selected, and the phase is unwrapped by using the reliability-guided fast phase unwrapping algorithm. 5) Using the unwrapped phase for fine matching, a high-precision parallax map is obtained. 6) The three-dimensional shape is reconstructed using the parallax. The experimental verification is carried out. The measurement volume of the system is 360 mm×290 mm×100 mm, and the maximum 3D point captured is 1280×1024 points. The 3D shape measurement speed of 100 f/s was achieved. The measurement standard deviation of the plane is 0.19 mm. Five planes with a distance of 1.00 mm are measured, and the average error of the measurement distance is 0.05 mm.

Ying X L, Yao J Y, Zhang X S, *et al.* Fringe projection based three-dimensional measurement system by the light-source-stepping method using LD[J]. *Opto-Electron Eng*, 2021, 48(11): 210298; DOI: 10.12086/oe.2021.210298

Foundation item: the Natural Science Foundation of Zhejiang Province (LY17F050002)

* E-mail: liyong@zjnu.cn