



DOI: 10.12086/oe.2021.210114

基于蚁群相位抖动优化的高质量三维形貌测量

邢生平, 蔡宁, 林斌*

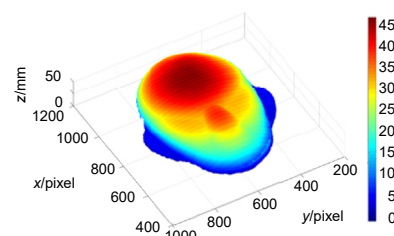
浙江大学 现代光学仪器国家重点实验室 国家光学仪器工程技术研究中心, 浙江 杭州 310027

摘要: 离焦抖动技术有效避免了商用投影仪引入的非线性效应, 能够实现高速动态测量, 但是离焦后的二值抖动条纹和标准正弦条纹并不完全贴近, 测量过程中会有一定的偏差。针对这个测量误差问题, 本文提出一种基于改进二进制蚁群算法的优化方法, 从相位域对二值离焦抖动技术进行优化改进, 较好地提高测量精度。通过对小尺寸二值块的优化替代整个优化过程, 提高优化效率。仿真和实验结果证明: 本方法在不同离焦情况下都能实现有效的三维测量。

关键词: 二值图像; 改进二进制蚁群算法; 抖动; 三维形貌获取

中图分类号: TN247

文献标志码: A



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

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

High-quality 3D shape measurement based on ant colony phase jitter optimization

Xing Shengping, Cai Ning, Lin Bin*

State Key Laboratory of Modern Optical Instruments, Chinese National Engineering Center of Optical Instrument, Zhejiang University, Hangzhou, Zhejiang 310027, China

Abstract: Defocus dithering technology effectively avoids the non-linear effects introduced by commercial projectors and can achieve high-speed dynamic measurement. However, the binary dithering stripes after defocusing and the standard sinusoidal stripes are not completely close, and there will be a certain deviation in the measurement process. Aiming at the measurement error, this paper proposes an optimization method based on an improved binary ant colony algorithm, which optimizes and improves the binary defocus dithering technology from the phase domain to better improve the measurement accuracy. Through the optimization of small-size binary blocks, the entire optimization process is replaced, and the optimization efficiency is improved. Simulation and experimental results prove that this method can achieve effective three-dimensional measurement under different defocus conditions.

Keywords: binary image; Improved binary ant colony algorithm; dithering; three-dimensional topography acquisition

收稿日期: 2021-04-09; 收到修改稿日期: 2021-06-28

基金项目: 浙江省科技计划资助项目(2017C31080)

作者简介: 邢生平(1991-), 男, 硕士研究生, 主要从事结构光三维测量和图像处理的研究。E-mail: 21730071@zju.edu.cn

通信作者: 林斌(1964-), 男, 博士, 教授, 主要从事图像传感及处理、光电测量技术和仪器的研究。E-mail: wjlin@zju.edu.cn

版权所有©2021 中国科学院光电技术研究所

1 引言

数字条纹投影三维测量技术通过采集被物体高度调制后的变形条纹图像解析三维高度信息^[1-3], 具有低成本、高精度、非接触等优点^[3-6], 在虚拟现实、零件加工、三维重建等领域应用广泛。但是商用投影仪的非线性效应在投射条纹图案时对条纹的正弦性产生了干扰, 严重影响实验结果。

通过研究人员的不断深入研究发现, 离焦二元编码技术能消除投影仪的非线性误差, 避免各种方式的误差补偿操作^[7-9]。因为离焦二元编码对象只有 0 和 1, 位深只有一位, 不需要进行非线性校正, 因此非线性问题能够得到解决, 而且二值离焦技术投射的二值图像能提高投影仪的投影速度, 可以实现高速动态测量, 但是测量精度仍有待提高。

为了解决这个问题, 研究人员提出了二值方波离焦技术^[10]、最优脉冲宽度调制技术^[11]等, 条纹周期较短时, 这些技术有效解决了测量精度的问题。但是这些一维调制技术对图像二维信息的利用率不够, 条纹周期增加时, 仍然存在测量误差问题。

抖动技术有效利用图案的二维信息, 在离焦投影后可以产生高质量的二值条纹, 极大改进了离焦结构光三维测量在处理长周期条纹时的实验效果, 但是短周期测量时仍存在测量误差^[12-13]。抖动优化技术最大程度地减小二值条纹与理想正弦条纹之间的灰度差值, 提高不同周期时条纹的正弦性, 得到高质量的离焦二值条纹, 有效改进不同周期的条纹的实验效果。

本文提出一种基于改进二进制蚁群算法的优化方法, 提高不同离焦程度时二值条纹的正弦性, 减小相位误差。通过对二值块的优化替代二值图案的优化, 提高了优化过程。仿真和实验结果表明: 在不同离焦程度下, 本文所提方法能有效提高测量精度。

2 原理

2.1 三步相移法

相移法是目前应用较为广泛的光学测量方法之一, 具有运算简单、精度高等特点, 相移步数越多, 测量精度越高。三步相移法因只需要最少的投影图像而广泛应用于动态三维测量。操作中, 将正弦条纹分 3 次投影到物体表面, 每次投影光栅的相位差为 $2\pi/3$, 灰度值可以表示为

$$I_1(x, y) = B + A \cos(\varphi - 2\pi/3), \quad (1)$$

$$I_2(x, y) = B + A \cos(\varphi), \quad (2)$$

$$I_3(x, y) = B + A \cos(\varphi + 2\pi/3), \quad (3)$$

式中: B 表示背景光强, A 表示调制参数, $\varphi(x, y)$ 表示待求相位值, 求解后得到:

$$\varphi(x, y) = \arctan \left(\frac{\sqrt{3}(I_1(x, y) - I_3(x, y))}{2I_2(x, y) - I_1(x, y) - I_3(x, y)} \right). \quad (4)$$

分析上式中的反正切函数, 其值域在 $(-\pi, \pi]$ 主值区间内, 通过相位解包裹操作后得到连续的绝对相位, 实现精确的三维重建^[5,14]。

2.2 误差扩散抖动原理

抖动技术在图像处理、打印等领域应用广泛, 其中较为典型的是误差扩散抖动技术^[15], 有 Floyd-Steinberg 抖动技术、Sierra-lite 抖动技术等。相比随机抖动和有序抖动等方法, 误差扩散抖动方法在自身灰度值基础上, 还考虑了邻近像素扩散的量化误差, 模拟正弦条纹的效果更好, 成像质量更佳。误差扩散抖动算法将当前像素的量化误差扩散到相邻像素上的过程表示为

$$I'(i, j) = I(i, j) + \sum_{m, n \in S} h(m, n) \times e(i - m, j - n), \quad (5)$$

式中: $I'(i, j)$ 表示量化误差扩散后图像的灰度值, $I(i, j)$ 表示原始图像的灰度值, 量化误差 $e(i, j)$ 通过误差扩散核函数 $h(m, n)$ 扩散到邻近像素。最常用的 Floyd-Steinberg 抖动函数的误差扩散核为

$$h(m, n) = \frac{1}{16} \begin{bmatrix} X & * & 7 \\ 3 & 5 & 1 \end{bmatrix}, \quad (6)$$

式中: $*$ 均表示当前正在处理的像素, X 表示已经处理过的像素。

2.3 遗传算法

遗传算法^[16]是一种智能进化算法, 发展至今已经十分成熟, 最先由 Holland J H 观察生物遗传进化的自然现象提出, 采用随机搜索机制, 能实现群体寻优, 全域搜索能力较强, 在路径规划、电路设计等诸多领域都有广泛的应用。其核心思想是在自然进化过程中, 将父本更优良的基因遗传给下一代, 始终把优良基因遗传下去, 伴随着交叉和变异等随机概率, 最终进化出拥有最优良基因的子代。

在应用遗传算法寻找最优时, 通过选择、交叉、变异等操作进行进化, 用适应度来评判每一代进化是否为更优, 最终收敛于最优。遗传算法最常用的编码方式是二进制编码方法, 因此, 本文中的遗传算法采用二进制编码方式, 与二进制蚁群算法结合也更容易。

2.4 二进制蚁群算法

受到蚁群觅食过程中寻找最短路径的理论启发, Dorigo 等^[17]首先提出蚁群算法, 具体来说, 在同样的时间内, 蚂蚁按照信息素的大小来选择一条路径, 越短的路径上留下的信息素越多, 选择这条路径的蚂蚁也会越多, 信息素也将快速增加, 选择这条路径的概率就会变大, 是一种正反馈机制。这种算法局部搜索能力强大, 所有可供选择的路径构成了解空间, 最后信息素最多的这条路径就是最优解。

信息素随着时间不断消逝, 信息素的消逝快慢取决于残留因子 ρ [18-19]。 ρ 较大时, 信息素的积累速度会加快, 在正反馈的作用下, 收敛速度也会加快。相反, ρ 较小时, 信息素的积累速度变慢, 正反馈作用也会降低, 搜索速度也会变慢, 但是寻优能力会相应提升。因此残留因子 ρ 直接影响着收敛速度和寻优能力。

为了解决离散空间问题,发展出了二进制蚁群算法^[20-21]。二进制蚁群算法也遵循信息素正反馈这个关键机制,依据信息素大小来选择前进方向,只是用二进制的字符串表示单个蚂蚁在某个节点 (i, j) 对下一个节点的选择状态,选择对象仅为0和1,二进制蚁群算法中个体的行进机制如图1。

信息素决定着蚂蚁下一条路径的移动方向，因此如何选择下一条路径取决于移动概率 P_{ij} ，二进制蚁群算法根据状态选择对象对基本蚁群算法的转移概率公式调整为

$$P_{ij}(0) = \frac{\tau_{ij}(0)^\alpha \eta_{ij}(0)^\beta}{\tau_{ij}(0)^\alpha \eta_{ij}(0)^\beta + \tau_{ij}(1)^\alpha \eta_{ij}(1)^\beta}, \quad (7)$$

$$P_{ij}(1) = 1 - P_{ij}(0) \quad , \quad (8)$$

式中: $P_{ij}(0)$ 和 $P_{ij}(1)$ 是在节点 (i, j) 上选择路径 0 或 1 的转移概率, $\tau_{ij}(0)$ 和 $\tau_{ij}(1)$ 是在节点 (i, j) 上路径 0 或 1

残留的信息素, $\eta_{ij}(0)$ 和 $\eta_{ij}(1)$ 是节点 (i, j) 上选择路径 0 或 1 的可见度, α 是信息启发因子, β 是期望启发因子。

为了提高收敛效率,严格遵循正反馈机制,完成一次路径的搜索,就要对信息素进行一次更新,信息素更新公式为

$$\tau_{ij}(0)(t+1) = \rho \times \tau_{ij}(0)(t) + \Delta\tau \quad , \quad (9)$$

$$\tau_{ij}(1)(t+1) = \rho \times \tau_{ij}(1)(t) + \Delta\tau \quad , \quad (10)$$

式中: $\Delta\tau=1/f_{\text{best}}$, f_{best} 是一次迭代后的最优解。

3 基于改进二进制蚁群算法的优化方法

3.1 目标函数

二值离焦技术的目的是优化离焦二值条纹的正弦性,尽可能减小与理想正弦条纹之间的灰度值误差^[21]。优化过程用数学语言表述为

$$\min_{f,G} \|E(x,y)\|_F = \min_{f,G} \|I(x,y) - G(x,y) \otimes f(x,y)\|_F, \quad (11)$$

式中： $\|\bullet\|$ 是 Frobenius 范数， $E(x,y)$ 表示像素灰度值误差， $I(x,y)$ 表示理想正弦图像， $f(x,y)$ 表示待优化的二值图像， $G(x,y)$ 表示高斯滤波内核， $\otimes$ 表示卷积操作。

3.2 优化过程

理想的正弦条纹图案具有对称性和周期性,因此,待优化的二值图像也应该具有相同的对称性和周期性,利用周期性和对称性,选取尺寸更小的二值块进行优化,最后拼成最优或近似最优二值图像。

遗传算法具有较强的随机搜索功能, 能实现全域搜索, 但是种群较多时搜索效率较慢。二进制蚁群算法运行效率高, 局部搜索能力强, 但是容易过早收敛。

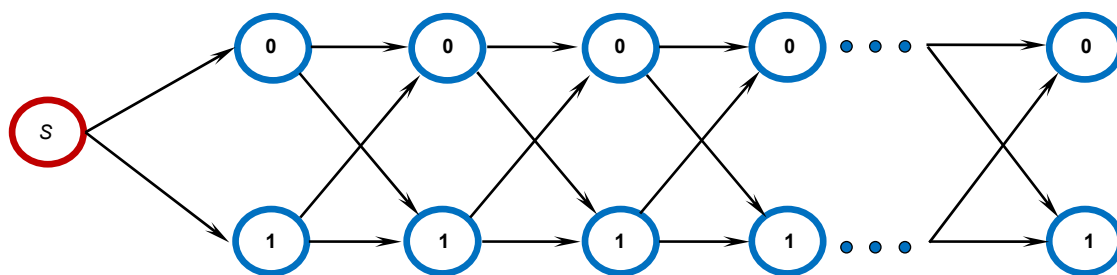


图 1 二进制蚁群算法的路径选择

Fig. 1 Path selection of binary ant colony algorithm

为了提高搜索精度和速度, 本文提出一种将遗传算法和二进制蚁群算法结合的改进二进制蚁群算法, 并对状态选择、能见度及信息素更新做了改进。

基本二进制蚁群算法在状态选择时, 只能看到下一个随机节点, 总体目标方向不明确。本文改进状态选择机制, 个体蚂蚁在状态选择过程中, 能看到所有未走过的节点, 根据比较目标函数的大小明确下一个节点, 根据转移概率公式确定去往这个节点的各种路径状态。最终所有的状态构成解空间, 目标函数值最小的状态集合为最优路径。

对二进制蚁群算法这种启发式算法来说, 起始点出发后的能见度影响着整个路径的寻优过程, 较优的能见度能极大地提高算法找到最优解的性能。本方法

利用遗传算法为二进制蚁群算法提供初始能见度, 具体方法是比较遗传算法得到的状态集合中 0 和 1 的比例, 比例越高能见度越高, 比例越低能见度越低。

为了避免二进制蚁群算法中信息素正反馈导致的过早收敛问题, 本方法在一次迭代完成后对全部路径上的信息素进行一次随机概率的更新, 即:

$$\tau_{ij}(0)(t+1) = \tau_{ij}(0)(t) + \delta(t+1) \cdot \Delta\tau(0), \quad (12)$$

$$\tau_{ij}(1)(t+1) = \tau_{ij}(1)(t) + \delta(t+1) \cdot \Delta\tau(1), \quad (13)$$

式中: $\delta(t+1) = \delta(t) + \varepsilon$, ε 为小于 0.1 的随机数。

本文的优化框架流程如图 2 所示。其主要步骤可以描述为:

- 1) 初始化设置: 确定算法参数。
- 2) 确定个体维度: 选取 $S_x \times S_y$ 的一维数组作为种

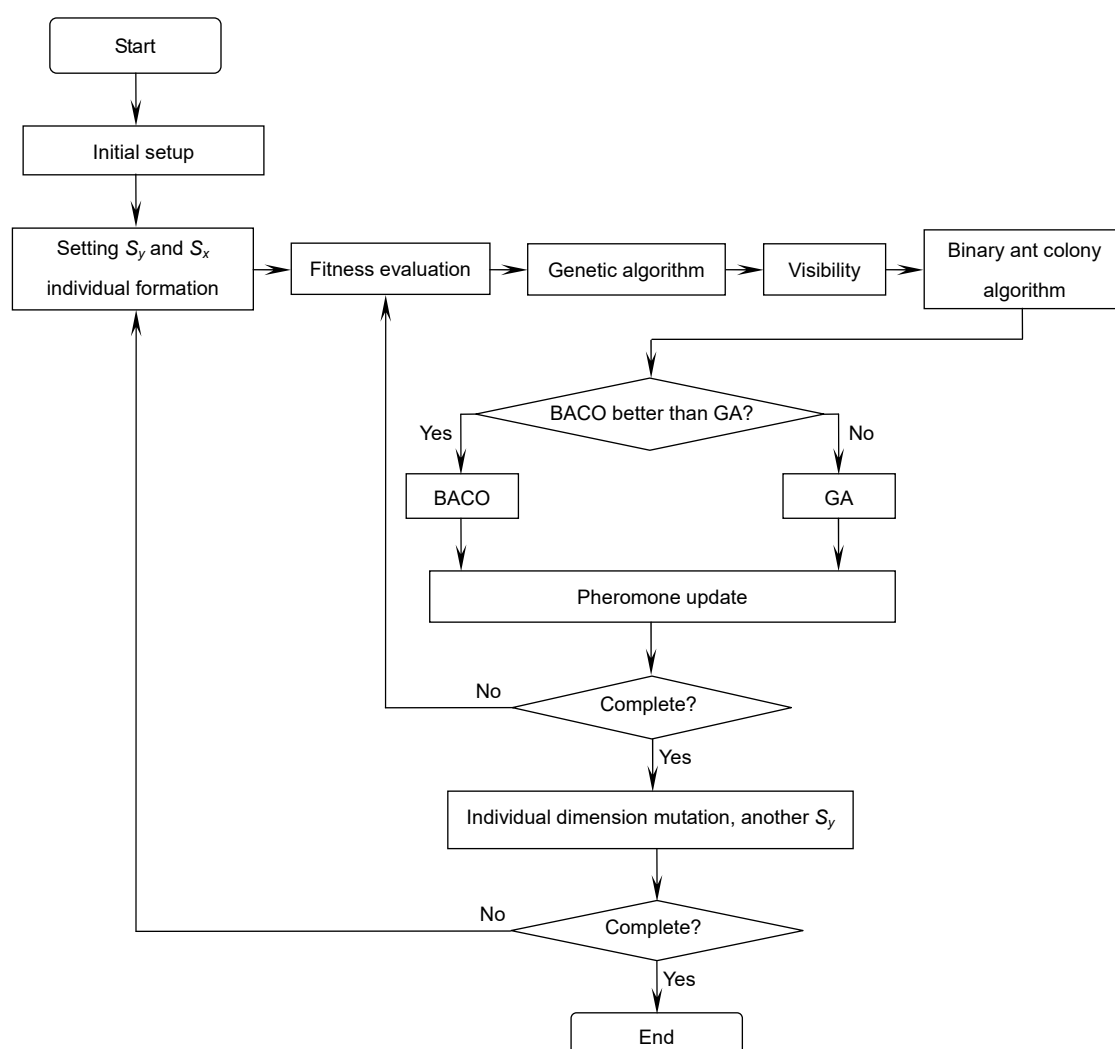


图 2 本文方法的流程图

Fig. 2 Flowchart of the propose method

群的大小, S_x 是条纹周期的一半, 即 $S_x = T/2$, $S_y = 1$ 。

3) 适应度评估: 确定种群规模为 60, 用方程(11)进行个体适应度评估。

4) 遗传算法较优解: 运行遗传算法操作, 进化出较优个体。

5) 能见度: 根据遗传算法较优解中不同状态的比例得到初始能见度, 并生成初始蚁群。

6) 二进制蚁群较优解: 通过运行算法得到本次寻优过程的最优解。

7) 比较: 比较二进制蚁群算法和遗传算法得到的较优解, 谁更优输出谁的结果。

8) 信息素更新: 用本次寻优过程的最优解更新所有路径上的信息素。

9) 判断终止: 终止条件为最优值改变不超过 1×10^{-6} 或迭代次数超过 3000 次, 如果不满足跳转到步骤 3)。

10) 维度约束: $S_y = S_y + 1$, $S_y \leq 15$, 转到步骤 2)。

11) 完整图像: 根据对称性和周期性, 拼出完整二值条纹。

4 仿 真

为了佐证本文所提方法, 选定条纹周期 $T=15$, 20, ..., 115, 120 来进行仿真实验。用模板大小为 $G(G=6 \times 14)$, 标准差为 ε ($\varepsilon = G/3$) 的高斯滤波器来表示投影仪的不同离焦程度, 选定模板大小 $G=6 \times 6$, 10×10 , 14×14 的高斯滤波器效果分别对应投影仪轻度离焦、中度离焦、重度离焦的效果。利用三步相移法来计算相位值, 仿真设计选取 800×600 分辨率大小的图案。

图 3 为 Floyd-Steinberg 误差扩散抖动算法和本文方法生成的二值图案。条纹周期选择 15, 高斯滤波器模板大小选择 6×6 。其中图 3(a) 是 Floyd-Steinberg 误差扩散抖动方法产生的二值图案, 图 3(b) 是经过 6×6 模板大小的高斯滤波器滤波后的条纹图案, 图 3(c) 是本文方法生成的二值图案, 图 3(d) 是经过 6×6 模板大小

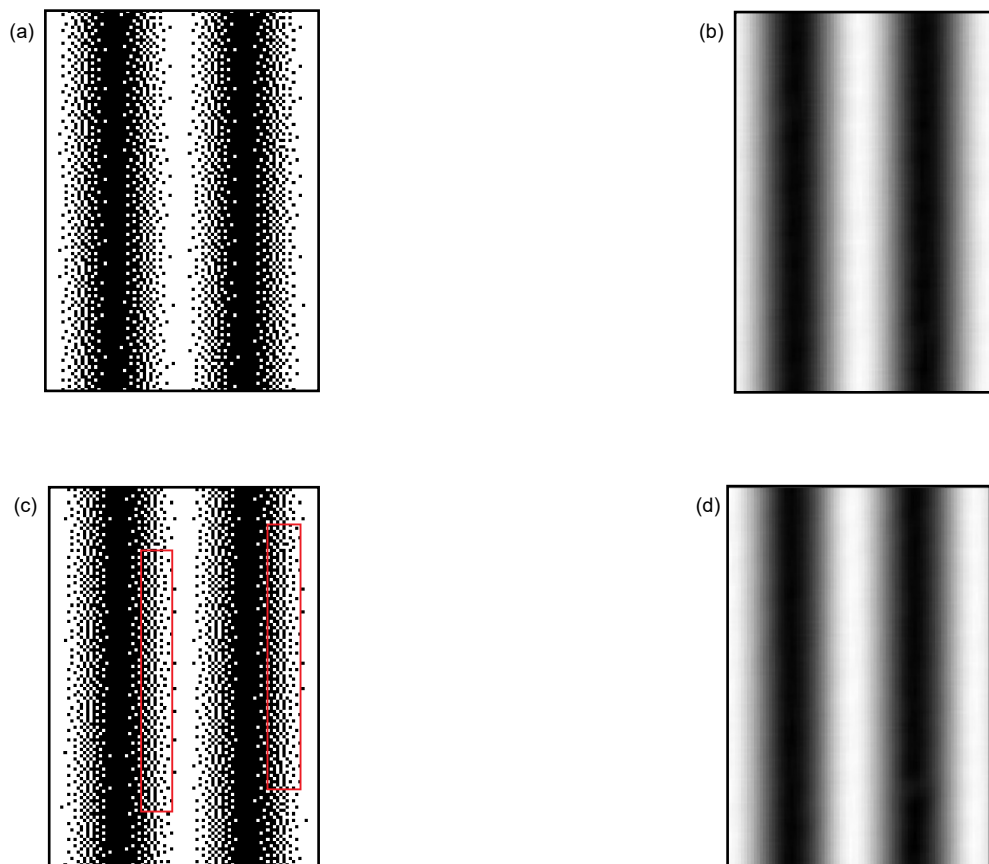


图 3 两种方法生成的二值图案及高斯滤波后的图案

Fig. 3 Binary patterns generated by two methods and patterns after Gaussian filtering

的高斯滤波器滤波后的条纹图案。对比看出, Floyd-Steinberg 误差扩散抖动算法生成的二值图案不对称性比较明显, 对条纹滤波后质量影响较大, 降低后期实验测量精度; 本文所提方法生成的二值图案分布整齐, 对称性强, 如图 3(c)中红色方框标出位置所示, 滤波后的条纹质量较高, 随着离焦程度的增加, 滤波后的条纹图将更加贴近标准正弦条纹图案, 说明本文方法有更显著的改进效果。

以标准正弦为对比, 对 Floyd-Steinberg 误差扩散抖动算法和本文方法进行误差分析如图 4。图中显示条纹周期为 15 时, Floyd-Steinberg 误差扩散抖动算法和本文方法在轻度离焦情况下与标准正弦条纹的强度误差和相位均方根误差比较的截面图, 截取范围选取两个周期大小。从截面图对比可以看出, 在轻度离焦情况下, Floyd-Steinberg 误差扩散抖动算法生成的二值条纹强度误差和相位均方根误差都比本文方法生成的二值条纹更大, 说明本文方法产生的二值条纹更接近正弦条纹。

图 5 为 Floyd-Steinberg 误差扩散抖动算法和本文方法在不同条纹周期, 不同高斯滤波器模板大小情况下与标准正弦条纹对比后的相位均方根误差和灰度值误差。图中图 5(a)、图 5(b)选用模板大小为 6×6 , 图 5(c)、图 5(d)选用模板大小为 10×10 , 图 5(e)、图 5(f)选用模板大小为 14×14 。图 5(a)、图 5(c)、图 5(e)对比表明, 在不同离焦程度下, 随着条纹周期增加, 两种方法的相位均方根误差逐渐减小, 本文方法的相位均

方根误差小于 Floyd-Steinberg 误差扩散抖动方法, 本文方法具有更好的正弦相似性, 在周期较短时效果更加明显; 图 5(b)表示轻度离焦情况下两种方法的灰度误差, Floyd-Steinberg 抖动方法具有最大的误差(约等于 4), 本文方法误差明显较小。图 5(b)、图 5(d)、图 5(f)表明, 随着离焦程度增加, 两种方法的测量误差保持了同样的减小趋势, 但本文方法的误差始终远远小于 Floyd-Steinberg 误差扩散抖动方法。综上仿真结果表明, 本方法在不同周期、不同离焦量下都具有极大的优势。

5 实验

三维测量系统中的投影仪选用型号为 Esonic HD-720P 的高清投影仪, 分辨率为 1280×720 , 投影距离为 $0.35 \text{ m} \sim 0.55 \text{ m}$, 投影仪与相机中心点的距离约为相机选用大恒 MER-130-30UM 工业相机, 内置 Sony CCD 传感器芯片, 搭载 Computer M0814-MP2 型号镜头(镜头焦距 8 mm , 分辨率为 1280×1024), 投影仪光轴与相机光轴之间的角度约为 $\theta = 10^\circ$, 结构如图 6。

分别利用 Floyd-Steinberg 误差扩散抖动方法和本文方法对标准白板进行测量, 以标准正弦 16 步相移法获得的相位作为真值相位。投影仪的离焦程度是连续变化的, 通过手动方式进行调节。轻度离焦、中度离焦、重度离焦时的白板实验近似对应于 6×6 , 10×10 , 14×14 模板大小高斯滤波效果的仿真实验, 图 7 为两种方法在不同离焦程度下的相位均方根误差对比。

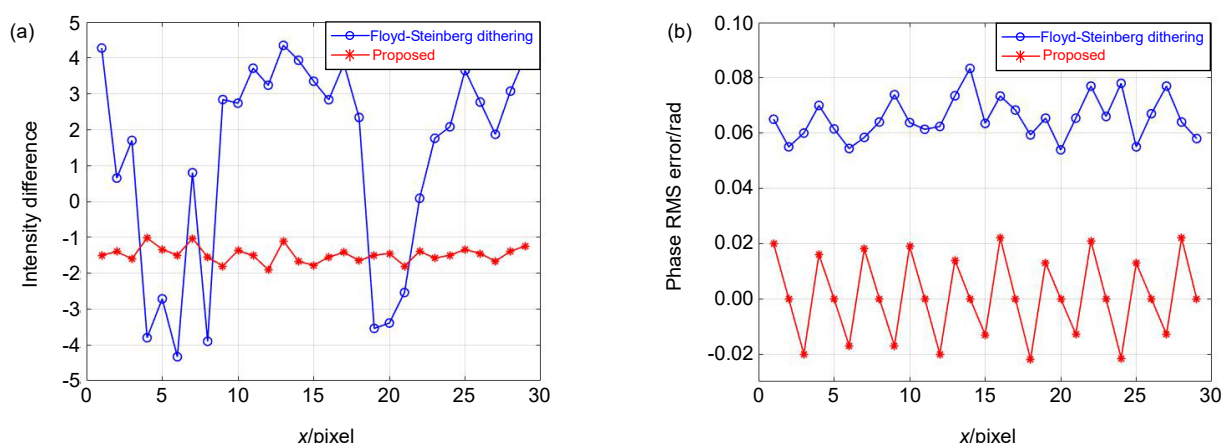


图 4 两种方法的对比。(a) 强度误差; (b) 相位均方根误差
Fig. 4 Comparison of the Floyd-Steinberg dithering method and the proposed method.
(a) The intensity difference; (b) The phase RMS error

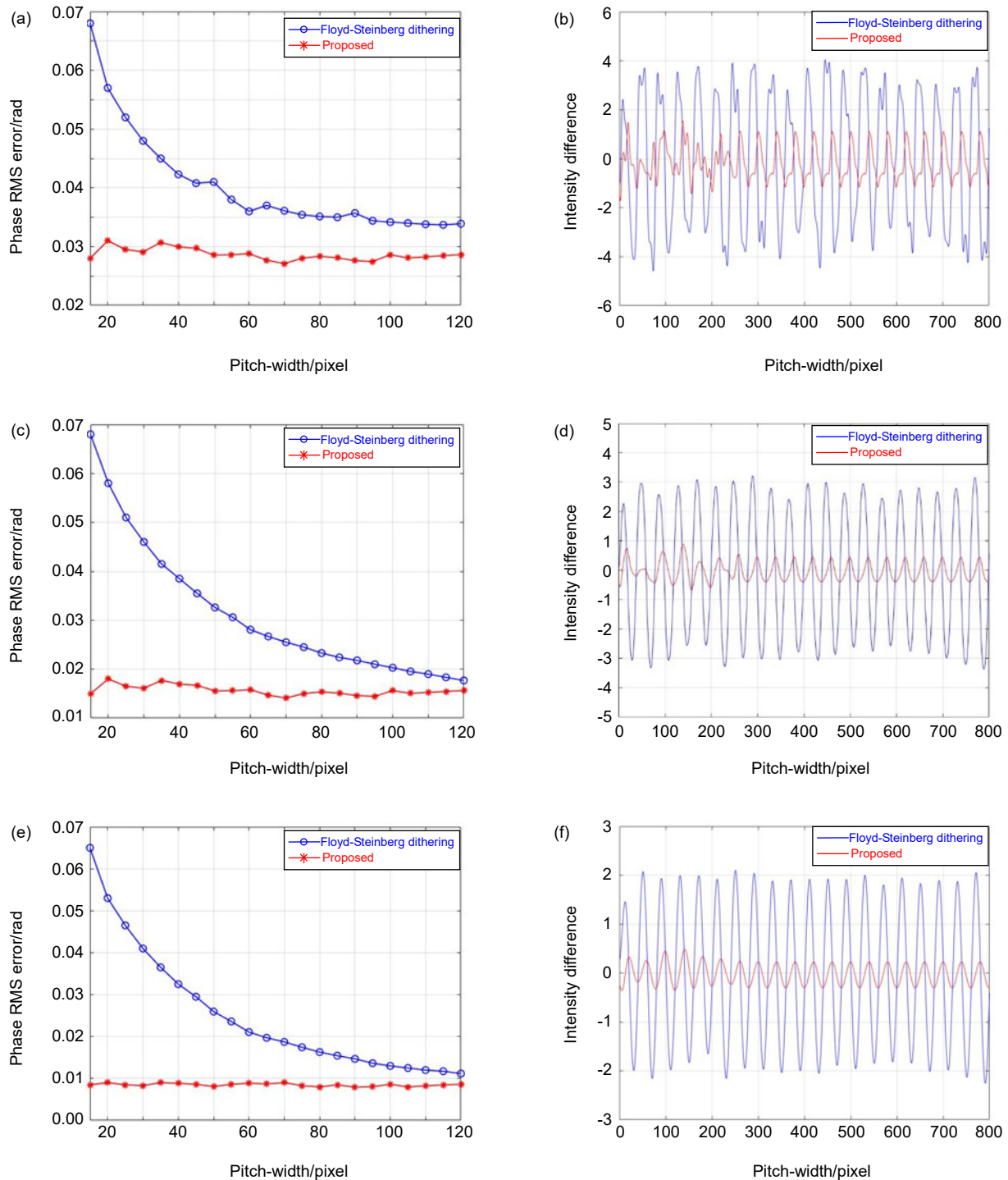


图 5 不同条纹周期和不同大小高斯滤波时，两种方法的相位误差和强度误差。

(a) 轻度离焦时的相位均方根误差; (b) 轻度离焦时的灰度值误差; (c) 中度离焦时的相位均方根误差;
(d) 中度离焦时的灰度值误差; (e) 重度离焦时的相位均方根误差; (f) 重度离焦时的灰度值误差

Fig. 5 The intensity difference and phase RMS error of the two methods between different fringe periods and different sizes of Gaussian filtering.

(a) Phase RMS error for mildly defocused; (b) Intensity error for mildly defocused;
(c) Phase RMS error for moderately defocused; (d) Intensity error for moderately defocused;
(e) Phase RMS error for severely defocused; (f) Intensity error for severely defocused

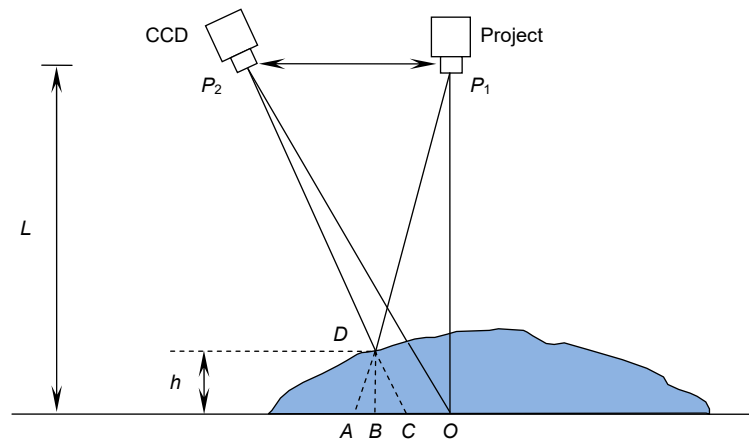


图 6 结构图

Fig. 6 Structure diagram

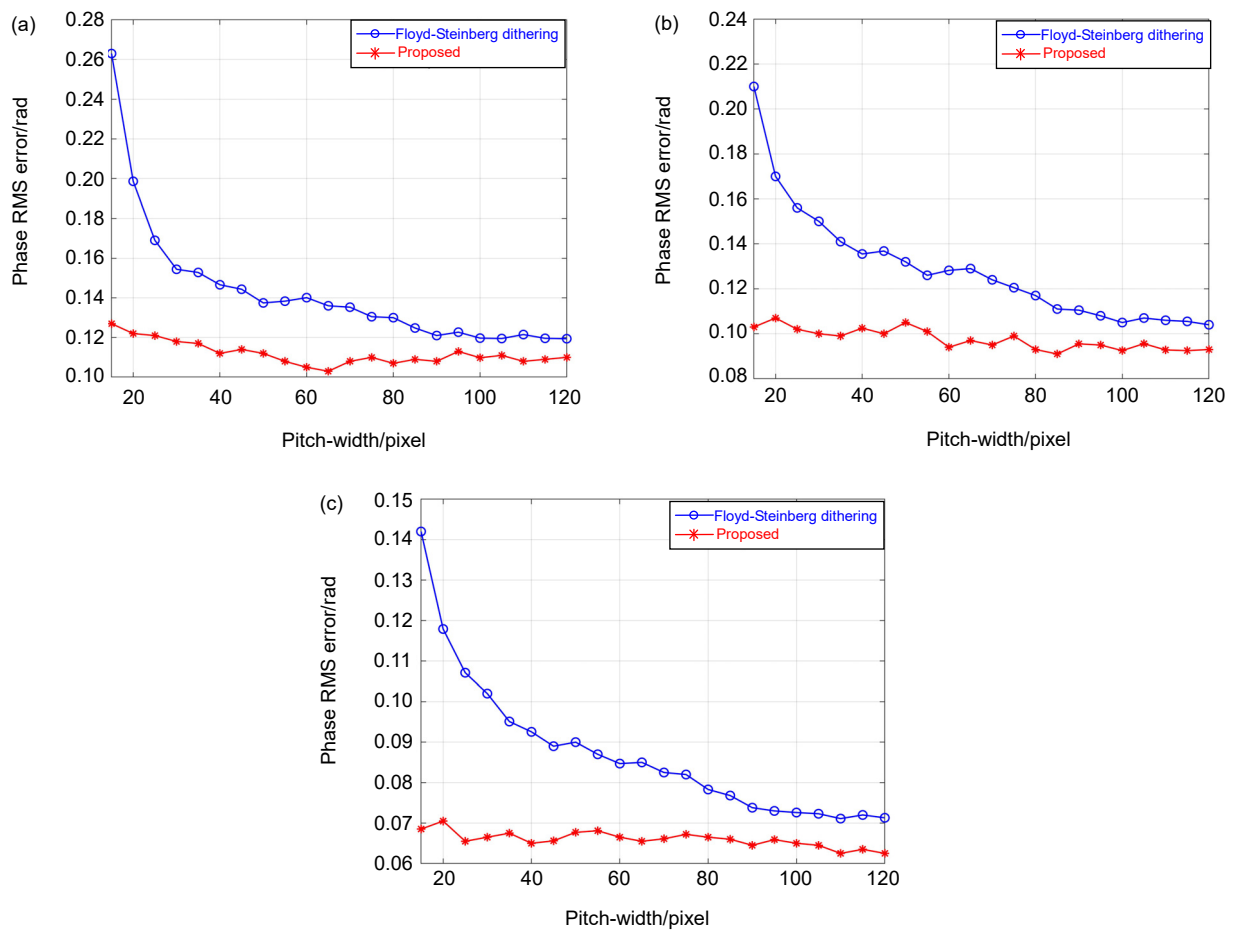


图 7 不同离焦程度下, 两种方法的测量结果。(a) 轻度离焦时的相位均方根误差对比; (b) 中度离焦时的相位均方根误差对比; (c) 重度离焦时的相位均方根误差对比

Fig. 7 Experimental results of comparing the two methods under amounts of defocusing.

(a) Mildly defocused; (b) Moderately defocused; (c) Severely defocused

测量结果表明,在一定离焦范围内,离焦程度增加,两种方法的相位均方根误差在一定程度上呈下降趋势,说明投影仪的高频信号在一定程度上受到离焦状态的抑制。而且,在不同离焦情况下,本文所提方法的改善效果明显优于 Floyd-Steinberg 误差扩散抖动算法,尤其在条纹周期较短时,效果更加明显,证明本文方法在不同离焦程度时都能实现较好的测量,与仿真结果吻合。

本文选取了一个三位特征明显的石膏模型来验证。实验中选择条纹周期为 15,同样用标准正弦 16 步相移法获得的相位作为真值相位。两种方法变形条纹图案如图 8(a)、图 8(b)所示。

图 9 表示两种方法三维测量结果。其中图 9(a)~9(c)为度离焦、中度离焦、重度离焦情况下的三维测量图,

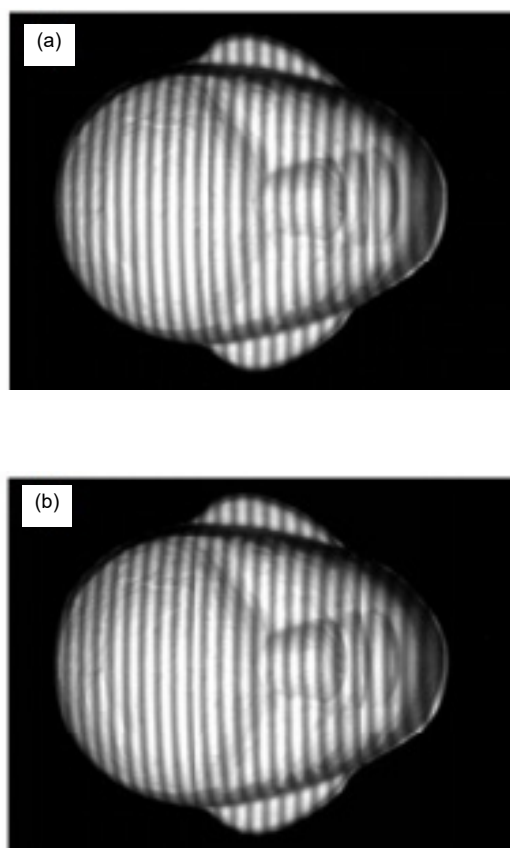


图 8 两种方法的变形条纹图案。

(a) Floyd-Steinberg 误差扩散方法产生的变形条纹图案; (b) 本文方法产生的变形条纹图案

Fig. 8 The deformed stripe patterns of two methods.

(a) The Floyd-Steinberg error-diffusion method;
(b) The proposed method

图 9(d)~9(f)为本文方法在轻度离焦、中度离焦、重度离焦时的三维测量图。表 1 是投影仪在不同离焦程度下两种方法的相位均方根误差值。分析可知:在轻度离焦时,两种方法的重建图都含有噪声,如图 9(a)、9(d)所示;对比图 9(a)~9(c)和图 9(d)~9(f)可知:随着离焦程度的加重,相位均方根误差呈下降趋势,模型重建结果表面逐渐光滑,三维特征也逐渐明显,但基于 Floyd-Steinberg 误差扩散抖动方法的改善程度相对较小,本文所提方法的改善效果相对明显。验证了本文方法在不同离焦程度下均可以有效改善 Floyd-Steinberg 误差扩散抖动方法,对不同程度的离焦程度具有鲁棒性,能实现更高质量的三维测量,符合仿真结果。

6 结 论

本文提出一种基于改进二进制蚁群算法的方案,通过对相位信息的优化,有效改善传统 Floyd-Steinberg 误差扩散抖动算法的三维测量精度。把优化后的二值块拼接成完整图案的操作,加速了优化过程。仿真和实验证明本方法能有效提高三维测量精度,对不同投影仪离焦程度都具有鲁棒性。

参考文献

- [1] Zhang W Z. Structured-light three dimensional measurement method based on digital projector[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2015.
张万祯. 数字投影结构光三维测量方法研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2015.
- [2] Su X Y, Zhang Q C. Dynamic 3-D shape measurement method: a review[J]. *Opt Lasers Eng*, 2009, **48**(2): 191–204.
- [3] Wang L, Chen C, Gao N, et al. Three-dimensional shape measurement of high reflective objects based on adaptive fringe-pattern projection[J]. *J Appl Opt*, 2018, **39**(3): 373–378.
王柳, 陈超, 高楠, 等. 基于自适应条纹投影的高反光物体三维面形测量[J]. *应用光学*, 2018, **39**(3): 373–378.
- [4] Yang H, Cai N, Lin B, et al. Defocus camera calibration based on sinusoidal phase coding[J]. *Acta Photon Sin*, 2018, **47**(7): 0715002.
杨浩, 蔡宁, 林斌, 等. 基于正弦相位编码的相机离焦标定[J]. *光子学报*, 2018, **47**(7): 0715002.
- [5] Mao C L, Lu R S, Dong J T, et al. Overview of the 3D profilometry of phase shifting fringe projection[J]. *Acta Metrol Sin*, 2018, **39**(5): 628–640.
毛翠丽, 卢荣胜, 董敬涛, 等. 相移条纹投影三维形貌测量技术综述[J]. *计量学报*, 2018, **39**(5): 628–640.
- [6] Xiong Y K, Zhang W Z, Yang S T, et al. Symmetric and asymmetric dual structure light coding methods for absolute phase retrieval[J]. *Acta Photon Sin*, 2016, **45**(3): 0310002.
熊义可, 张万祯, 杨松涛, 等. 用于绝对相位还原的对称式和非对称式二元结构光编码[J]. *光子学报*, 2016, **45**(3): 0310002.

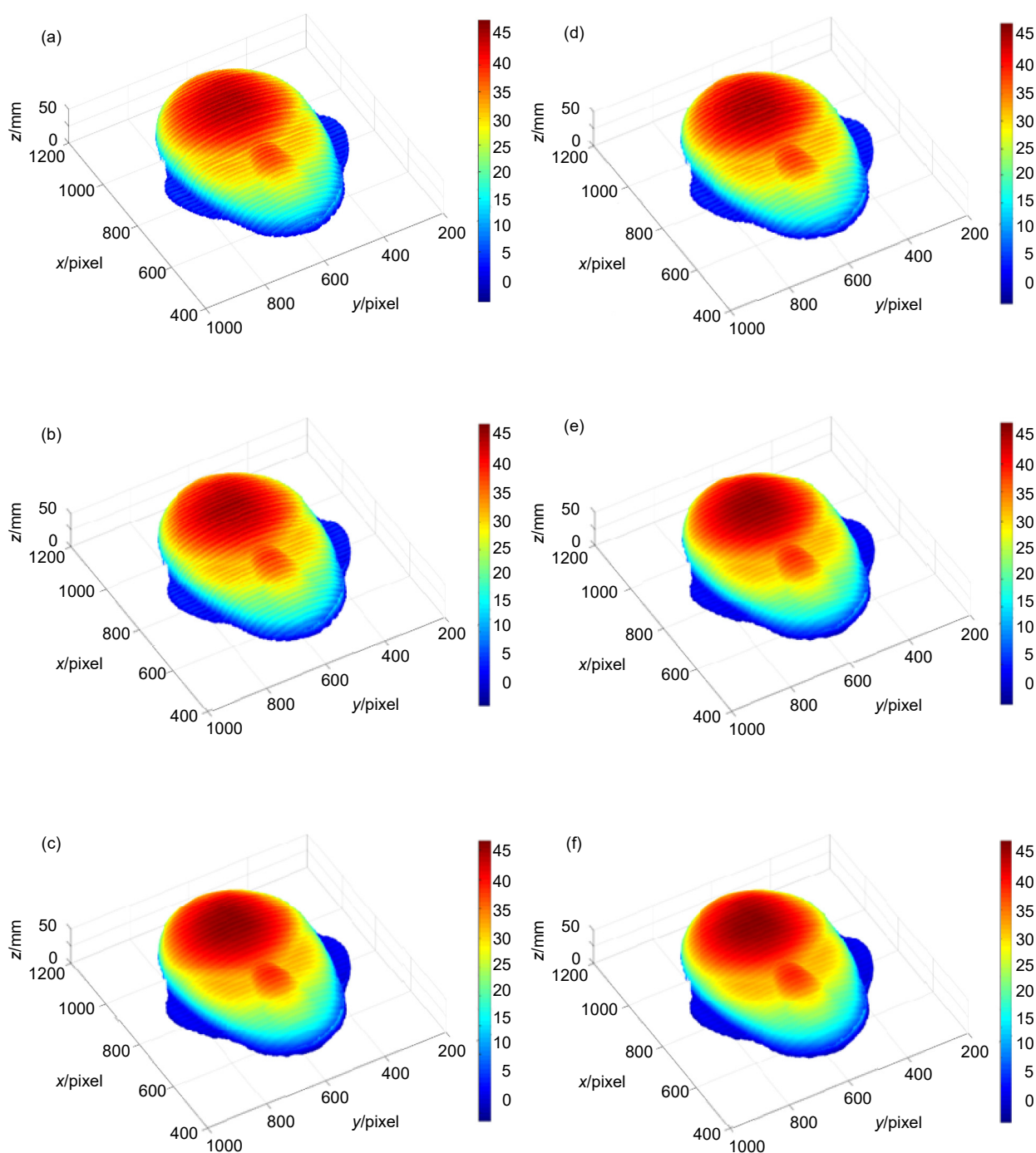


图9 两种方法在轻度、中度、重度离焦情况下的重建图。

(a)~(c) Floyd-Steinberg 误差扩散抖动算法; (d)~(f) 本文方法

Fig. 9 Reconstruction of the two methods in mildly, moderate, and severe defocus conditions.

(a)~(c) The Floyd-Steinberg error-diffusion method; (d)~(f) The proposed method

表1 两种方法在不同离焦程度下的相位均方根误差

Table 1 The phase RMS errors of two methods with different amounts of defocusing

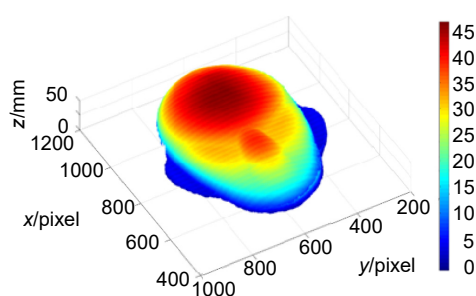
	Mildly defocused	Moderately defocused	Severely defocused
Floyd-Steinberg	0.2694	0.2217	0.1586
Proposed	0.1283	0.1010	0.0573

- [7] Wang Y J, Jiang C F, Zhang S. Double-pattern triangular pulse width modulation technique for high-accuracy high-speed 3D shape measurement[J]. *Opt Express*, 2017, **25**(24): 30177–30188.
- [8] Zhao L W, Da F P, Zheng D L. Method for binary grating generation using defocused projection for three-dimensional measurement[J]. *Acta Opt Sin*, 2016, **36**(8): 0812005.
赵立伟, 达飞鹏, 郑东亮. 离焦投影三维测量的二值光栅生成方法[J]. *光学学报*, 2016, **36**(8): 0812005.
- [9] Dai J F, Li B W, Zhang S. High-quality fringe pattern generation using binary pattern optimization through symmetry and periodicity[J]. *Opt Lasers Eng*, 2014, **52**: 195–200.
- [10] Lei S Y, Zhang S. Flexible 3-D shape measurement using projector defocusing[J]. *Opt Lett*, 2009, **34**(20): 3080–3082.
- [11] Wang Y J, Zhang S. Optimal pulse width modulation for sinusoidal fringe generation with projector defocusing[J]. *Opt Lett*, 2010, **35**(24): 4121–4123.
- [12] Xian T, Su X Y. Area modulation grating for sinusoidal structure illumination on phase-measuring profilometry[J]. *Appl Opt*, 2001, **40**(8): 1201–1206.
- [13] Schuchman L. Dither signals and their effect on quantization noise[J]. *IEEE Trans Commun Technol*, 1964, **12**(4): 162–165.
- [14] Zhang S. High-speed 3D shape measurement with structured light methods: a review[J]. *Opt Lasers Eng*, 2018, **106**: 119–131.
- [15] Lohry W, Zhang S. Genetic method to optimize binary dithering technique for high-quality fringe generation[J]. *Opt Lett*, 2013, **38**(4): 540–542.
- [16] Wang S H. Hyperspectral image spectral and texture feature extraction based on improved binary ant colony algorithm[D]. Wuhan: Wuhan University, 2018.
王偲晗. 基于改进二进制蚁群算法的高光谱影像光谱与纹理特征提取[D]. 武汉: 武汉大学, 2018.
- [17] Dorigo M, Maniezzo V, Colomi A. Positive feedback as a search strategy[R]. Milan: Milan Politecnico di Milano, 1991: 91–106.
- [18] Xiong W Q, Wei P. Binary ant colony evolutionary algorithm[J]. *Acta Automat Sin*, 2007, **33**(3): 259–264.
熊伟清, 魏平. 二进制蚁群进化算法[J]. *自动化学报*, 2007, **33**(3): 259–264.
- [19] Qian Q, Cheng M Y, Xiong W Q, et al. Reviews of binary ant colony optimization[J]. *Appl Res Comput*, 2012, **29**(4): 1211–1215.
钱乾, 程美英, 熊伟清, 等. 二元蚁群优化算法研究综述[J]. *计算机应用研究*, 2012, **29**(4): 1211–1215.
- [20] Cai N, Chen Z B, Lin B, et al. Genetic method to optimize dithering technique in phase domain for high-quality binary fringe generation[J]. *Acta Photon Sin*, 2019, **48**(8): 0811002.
蔡宁, 陈浙泊, 林斌, 等. 基于遗传算法相位抖动优化的高质量二值条纹产生方法[J]. *光子学报*, 2019, **48**(8): 0811002.
- [21] Cai N, Chen Z B, Lin B, et al. High-quality three-dimensional shape measurement based on binary particle swarm dithering optimization[J]. *Chin J Lasers*, 2019, **46**(10): 1004003.
蔡宁, 陈浙泊, 林斌, 等. 基于离散粒子群抖动优化的高质量三维形貌测量[J]. *中国激光*, 2019, **46**(10): 1004003.

High-quality 3D shape measurement based on ant colony phase jitter optimization

Xing Shengping, Cai Ning, Lin Bin*

State Key Laboratory of Modern Optical Instruments, Chinese National Engineering Center of Optical Instrument,
Zhejiang University, Hangzhou, Zhejiang 310027, China



3D reconstruction of the proposed method

Overview: The digital fringe projection 3D measurement technology has become the research focus in the field of 3D measurement due to its low cost, high precision, non-contact, and other advantages. It has been widely used in many fields, such as industrial inspection, 3D printing, face recognition, and medical imaging. Knowing the world and transforming the world provide great convenience. In recent years, the rapid development of the digital processing technology has promoted the development of digital projection structured light technology. With the continuous advancement of technology and the substantial increase in computing power, how to use these technological developments to achieve an accurate description of the three-dimensional shape of objects has become a computer research hotspot in the field of visual inspection, but the non-linear effects introduced by commercial projectors interfere with the sine of the fringe when projecting the fringe pattern and affect the experimental results. The study found that the defocusing binary coding technology can eliminate the non-linear error of the projector and avoid various error compensation operations. The method does not need to perform non-linear correction, and the projected binary image can increase the projection speed of the projector and achieve high-precision and high-speed measurement. But the binary jitter fringe after defocusing is not completely close to the standard sine fringe, and there will be a certain deviation in the measurement process.

One-dimensional modulation technologies, such as binary square wave defocusing technology and optimized pulse width modulation technology, can effectively solve the problem of short-term measurement accuracy of fringe periods. Due to the insufficient use of the two-dimensional information of the image, the problem of measurement error still exists when the fringe period increases. The dithering technology effectively utilizes the two-dimensional information of the pattern and can produce high-quality binary fringes after defocusing projection, which greatly improves the experimental effect of defocused structured light three-dimensional measurement in processing long-period fringes, but short-period measurement still exists error. The dither optimization technology minimizes the grayscale difference between the binary fringe and the ideal sinusoidal fringe, and it can improve the sine value of the fringe with different periods. The method we propose can obtain high-quality defocused binary fringes and effectively improve the experimental results of the quality of the fringes with different periods.

This paper proposes an optimization method based on an improved binary ant colony algorithm, which combines the advantages of genetic algorithm and binary ant colony algorithm. Through optimization in the phase domain, the quality of the binary fringe at different defocus degrees is improved, and the phase error is reduced. At last, the measurement accuracy is improved effectively. The simulation and experimental results show that the method proposed in this paper can deal with the measurement under different defocus degrees and is robust.

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; DOI: 10.12086/oe.2021.210114

Foundation item: the Science and Technology Major Projects of Zhejiang Province, China (2017C31080)

* E-mail: wjlin@zju.edu.cn