

基于改进单调法的阴影区相位噪声校正方法

陶四杰, 白瑞林*, 王昌龙

江南大学物联网工程学院轻工过程先进控制教育部重点实验室, 江苏 无锡 214122

摘要 针对双目视觉系统中单调法校正阴影区相位噪声时存在校正不足的问题, 提出了一种改进型相位校正方法。利用四步相移与多频外差求解工件表面的绝对相位信息, 通过单调不减性对相位噪声进行校正。分析多组实验对象校正不足时相位噪声特点, 根据相位频率矩阵计算固定区间内非零相位出现的频率来校正离散相位噪声, 利用相邻间断点实际相位与预测相位的差值对连续相位噪声进行校正。计算间断点间的斜率与两侧非零相位的拟合斜率并进行判断, 利用线性法补齐因随机噪声而被置零的部分相位, 保证了工件信息的完整性。实验结果表明: 所提方法可以有效校正阴影区的相位噪声, 可适用于不同的实验对象, 圆柱体木质工件的平均测量误差为 0.0859 mm, 精度可满足目标抓取的位姿估计要求。

关键词 机器视觉; 阴影区; 相位校正; 多频外差

中图分类号 TP391.4

文献标志码 A

doi: 10.3788/LOP57.021503

Correction Method of Shadow-Area Phase Noise Based on Improved Monotone Method

Tao Sijie, Bai Ruilin*, Wang Changlong

Key Laboratory of Advanced Process Control for Light Industry (Ministry of Education),
School of Internet of Things Engineering, Jiangnan University, Wuxi, Jiangsu 214122, China

Abstract Herein, an improved phase correction method is proposed to address insufficient correction when a monotone method is applied to phase noise in the shadow area of binocular vision systems. The absolute phase information on the workpiece surface is solved using a four-step phase shift and multi-frequency heterodyne, and the phase noise is corrected using a monotone nonreduction method. We then analyze the characteristics of phase noise with insufficient correction of multiple sets of different experimental objects. Discrete phase noise is corrected based on the frequency at which non-zero phase occurs over a fixed interval calculated by the phase frequency matrix, and the continuous phase is corrected using the difference between the actual and predicted phases of the adjacent discontinuous points. The integrity of workpiece information is ensured by calculating and judging the slope between the discontinuous points and the fitting slope of the non-zero phase on both sides, and using the linear method to compensate the partial phase that is set to zero because of the random noise. Experiments are also given to demonstrate that the proposed method effectively corrects phase noise in the shadow area and can be applied to different experimental objects. The cylindrical wooden workpiece has an average measurement error of 0.0859 mm, which meets the accuracy requirements of pose estimation for target grabbing.

Key words machine vision; shadow area; phase correction; multi-frequency heterodyne

OCIS codes 150.0155; 110.6880; 120.5050; 330.1400

收稿日期: 2019-05-10; 修回日期: 2019-06-10; 录用日期: 2019-06-24

基金项目: 江苏高校优势学科建设工程(PAPD)、江苏省产学研前瞻性联合研究项目(BY2015019-38)、江苏省科技成果转化专项资金资助项目(BA2016075)

* E-mail: 18861823498@163.com

1 引言

结构光技术中的相位法具有非接触、速度快、精度高、成本低等特点,已被广泛应用于随机箱体抓取领域^[1-3]的点云数据获取。利用相位法对工件进行三维轮廓重构时,需要正确获得光栅的相位信息^[4]。受投影仪和相机位姿的影响,相机视场中难免会存在光栅盲区,该区域最终会产生相位噪声。另外,工作环境等随机噪声的存在,也会使相位出现异常。这些相位噪声的校正结果,会直接影响后续工件位姿估计的精度。

目前,工业界求解相位主要采用多频外差法,该方法的特点是对物体表面的颜色不敏感、计算过程稳定,以及易于实现。针对利用多频外差法进行三维重构的相位噪声校正问题,研究人员提出的解决方法主要分为解包裹算法改进、Gamma 畸变校正和相位校正三类。陈松林等^[5-7]对解包裹方法进行改进,消除了相位跳跃性误差,减少了工程应用中相位噪声的产生,但不能解决环境因素引起的相位噪声校正的问题。Lü 等^[8]采用自校正技术来解决投影仪的 Gamma 畸变问题,该方法能提高光栅投影的正弦性,但计算比较复杂。Zuo 等^[9]指出,利用四步相移法可以减小投影仪非线性的影响。相位校正主要是依据相位的邻域信息,因此邻域的选择方法会直接影响相位噪声校正的效果。文献[10-11]中利用相邻相位对误差相位进行了分析和校正,但只能校正环境等随机噪声产生的少量相位噪声。熊维等^[12]利用整体相位变化趋势建立了局部单调不减性判定准则,并采用该准则对光栅盲区的相位噪声进行了校正,该方法可校正环境等随机噪声产生的相位噪声,但对光栅盲区的相位噪声仍存在校正不足的问题,从而影响了后续的相位匹配。

考虑到精度与实时性要求,本文利用四步相移与多频外差法求取工件表面的相位信息,选用易实现、速度快的单调法对阴影区相位噪声进行校正。对多种实验对象校正不足的相位噪声进行统计分析,定义相位频率矩阵,并采用固定长度区间内非零相位出现的频率对离散相位噪声进行校正,通过比较相邻间断点的实际相位与预测相位对连续相位噪声进行校正。此外,为了保证工件信息的完整性,利用线性法补齐,正确恢复出了因随机噪声而被置零的部分相位信息,提高了重构精度。

2 相位计算与相机视场分析

2.1 四步相移与多频外差

四步相移法能消除检测器偶次谐波的影响,在结构光视觉测量中被广泛应用。其原理是通过 4 幅正弦光栅图像来求解相位主值 $\phi(x, y)$, 表达式为

$$\phi(x, y) = \arctan \frac{I_4(x, y) - I_2(x, y)}{I_1(x, y) - I_3(x, y)}, \quad (1)$$

式中: $I_1(x, y)$ 、 $I_2(x, y)$ 、 $I_3(x, y)$ 和 $I_4(x, y)$ 分别为光栅图像相位移为 0 、 $\pi/2$ 、 π 和 $3\pi/2$ 时的光强。利用(1)式解得相位主值 $\phi(x, y)$ 的取值范围为 $[-\pi, \pi]$, 该值在整个测量空间内不唯一, 需要利用稳定性高且精度较好的多频外差法进行相位展开。

多频外差法^[13]通过将两种频率的相位函数 $\phi_1(x, y)$ 和 $\phi_2(x, y)$ 叠加, 得到了一种频率更低的相位函数, 则该相位函数对应的频率 f_{12} 可表示为

$$f_{12} = \frac{f_1 f_2}{f_1 - f_2}, f_1 > f_2 \quad (2)$$

式中: f_1 、 f_2 分别是相位函数 $\phi_1(x, y)$ 和 $\phi_2(x, y)$ 对应的频率。如图 1 所示, 在全场范围内无歧义地进行相位展开, 通过(2)式选择合理的 f_1 和 f_2 , 使 $f_{12} = 1$ 。

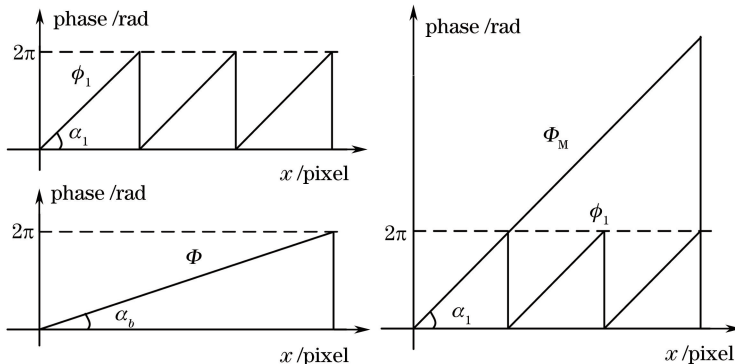


图 1 相位展开

Fig. 1 Phase unwrapping

在全场范围内,外差展开后的绝对相位值为

$$\Phi_M(x) = \phi_1(x) + 2\pi \times \text{Round}\left[\frac{\Phi(x) \tan \alpha_1 / \tan \alpha_2 - \phi_1(x)}{2\pi}\right], \quad (3)$$

式中: $\phi_1(x)$ 为四步相移求解得的相位主值; $\Phi(x)$ 为外差合成后的相位; $\Phi_M(x)$ 为外差展开后的相位;Round()为四舍五入函数。

2.2 相机视场分析

在实际的视觉测量中,受被测物体形状、相机与投影仪相对于被测物体位姿等因素的影响,相机视场中并不是每个位置都有理想的相位信息。

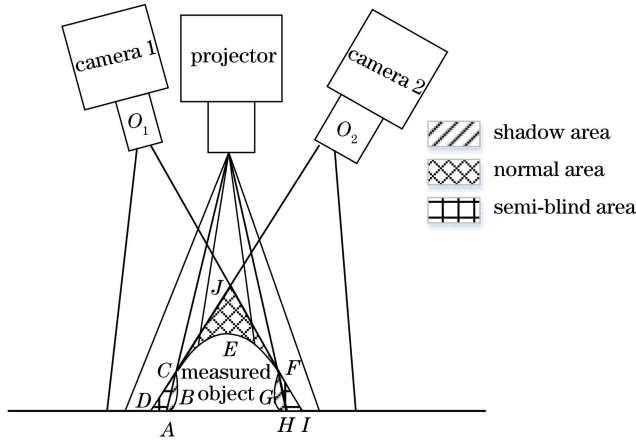


图2 相机视场

Fig. 2 Field of view of camera

图2为整个相机视场,该视场分为三部分:一是正常区域,两台相机都能拍摄到光栅条纹,如 CEFJ 段;二是半盲区,只有一台相机能拍摄到光栅条纹,如 ACD 段和 FHI 段;三是阴影区,没有光栅条纹,如 ABC 段和 HGF 段。投影仪投射数字光栅条纹。

在图3中,4个矩形框内代表阴影区,图3(b)为利用四步相移和多频外差法解得的工件光栅的相位信息。从图3(b)可以看出,阴影区没有正确的相位信息,相对于其他区域明显异常,破坏了相位整体的单调性,会影响后续的相位匹配。

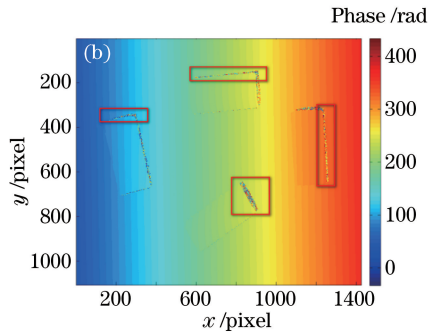
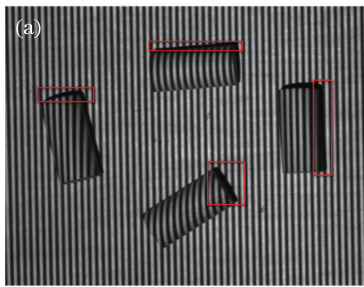


图3 工件的相位展开结果(左相机)。(a)光栅条纹;(b)相位展开

Fig. 3 Phase unwrapping result of workpieces (left camera). (a) Grating stripe; (b) phase unwrapping

3 阴影区相位噪声校正方法

在实际测量时,由于阴影区和随机噪声的存在,利用(3)式求得的相位存在噪声。若不进行校正,就会出现匹配错误,影响三维重构的效果。

3.1 基于单调不减性的相位噪声校正

李中伟^[14]指出,理想的相位应符合单调性。目前,校正阴影区相位噪声使用较多的方法是单调法,假设像素点 (i_0, j_0) 为待判定像素,相位值记为

$p(i_0, j_0)$,在其前后取相邻相位值。要想使相位满足局部单调性,可建立如下判定准则,

$$\begin{cases} p(i_0, j_0) - p(i_0, j_0 + 1) < 0 \\ p(i_0, j_0 - 1) - p(i_0, j_0) < 0 \\ |2 \times p(i_0, j_0) - p(i_0, j_0 - 1) - p(i_0, j_0 + 1)| < 2t_1 \end{cases}, \quad (4)$$

式中: t_1 为采集到的光栅图像采用外差法展开后正常相邻相位的最大差值。若符合(4)式,则该像素对应的相位值被保留,否则被置为零校正。

图4为利用单调法对图3(b)的第315行相位进行校正的实验结果。可以看出,仅利用单调法并不能

完全校正阴影区的相位噪声,少量随机噪声被校正,但不能复原正确的相位,这会影响后续的重构精度。

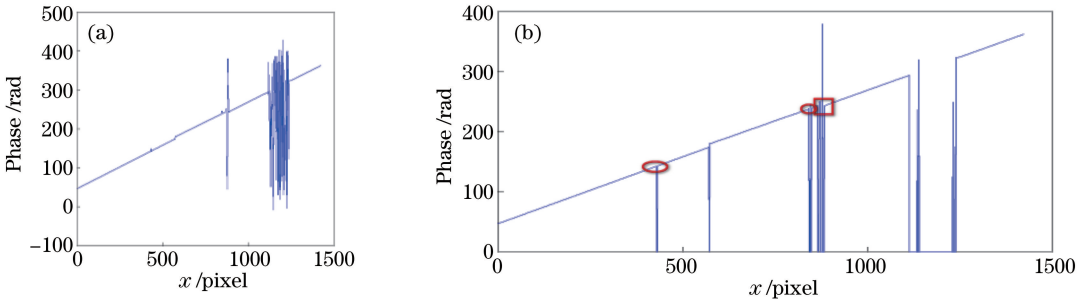


图4 第315行的绝对相位值。(a)校正前相位值;(b)校正后相位值

Fig. 4 Absolute phase values of the 315th line. (a) Phase value before correction; (b) phase value after correction

3.2 相位噪声校正方法

利用单调法对多种工件的阴影区相位噪声进行校正后均发现存在校正不足的问题。对校正不足的相位噪声进行数据统计分析,将其分为离散噪声和连续噪声两大类。为便于理解,借助图4进行分析。其中,连续噪声是由小阴影区解出异常相位、阴影区边缘相位解包裹出错等因素产生的,如图4(b)中矩形框框选的相位。单调法可校正部分随机噪声,但若不能恢复出正确的相位,就会影响工件信息的完整性,如图4(b)中椭圆框框选的相位。针对上述问题,在(4)式的基础上提出了对相位噪声进行校正的方法。假设经单调法校正后的第*i*行相位数据模型为

$$\dots, p(i, a), 0, \dots, 0, p(i, b), \dots, p(i, c), 0, \dots, 0, p(i, d), \dots, \quad (5)$$

式中: $p(i, a)$ 、 $p(i, b)$ 、 $p(i, c)$ 、 $p(i, d)$ 表示任意连续4个间断点的相位值, $p(i, a)$ 和 $p(i, c)$ 是向下间断点, $p(i, b)$ 和 $p(i, d)$ 是向上间断点,即 $p(i, a)$ 与 $p(i, b)$ 之间、 $p(i, c)$ 与 $p(i, d)$ 之间均为零相位值, $p(i, b)$ 与 $p(i, c)$ 之间均为非零相位值; a 、 b 、 c 、 d 表示相位所在的列,且 $a < b < c < d$ 。为便于描述,以下均基于(5)式进行分析。

3.2.1 基于相位频率矩阵的离散噪声校正

离散相位噪声的特点是随机性强、非零值、分布不连续。可通过统计在某个固定长度区间内非零相位出现的频率来判断其是否为离散相位噪声,为此,本文提出了基于相位频率矩阵的校正方法。

定义一个相位频率矩阵 \mathbf{A} 为

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & \dots & a_{1w} \\ a_{21} & a_{22} & \dots & a_{2w} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ a_{h1} & a_{h2} & \dots & a_{hw} \end{bmatrix}_{h \times w},$$

$$\begin{cases} \text{if } p(i, j) = 0, \text{ then } a_{ij} = 0 \\ \text{if } p(i, j) \neq 0, \text{ then } a_{ij} = 1 \end{cases}, \quad (6)$$

式中: a_{ij} 表示相位频率矩阵 \mathbf{A} 中的任意元素, $1 \leq i \leq h$, $1 \leq j \leq w$; h 为图像的高; w 为图像的宽。

在矩阵 \mathbf{A} 的第*i*行,对以 a_{ij} 为中心的固定长度区间 l 内的所有频率求和并取均值,即

$$s = \sum_{r=j-\frac{l-1}{2}}^{j+\frac{l-1}{2}} a_{ir} / l, \quad (7)$$

式中: $1 \leq i \leq h$, $\frac{l-1}{2} + 1 \leq j \leq w - \frac{l-1}{2}$, l 的取值参考数字图像中值滤波函数的模板,为奇数。

定义更新律为

$$a_{ij} = \begin{cases} 0, & s \leq \frac{l-1}{2l} \\ a_{ij}, & \text{other} \end{cases}, \quad (8)$$

若 $a_{ij} = 0$,令 $p(i, j) = 0$ 。考虑到离散噪声特性, l 取5为宜。

3.2.2 基于相邻间断点相位预测的连续噪声校正

正常相位的变化趋势是单调连续、相邻相位变化率相近,以及总体相位变化可预测估计。连续相位噪声的特点是少量单调连续、比周围相位异常大或异常小,以及变化趋势异常。可通过相邻间断点的实际相位与预测相位的对比来判断其是否为连续相位噪声,为此,本文提出了基于相邻间断点相位预测的校正方法。

基于(5)式,定义连续相位噪声判定准则为

$$p(i, a) - p(i, b) > \lambda n_1 \ \&\& \ p(i, d) - p(i, c) > \lambda n_2, \quad (9)$$

$$p(i, b) - p(i, a) > \lambda n_1 \ \&\& \ p(i, c) - p(i, d) > \lambda n_2, \quad (10)$$

式中: $\&\&$ 表示“与”; n_1 为 $p(i, a)$ 与 $p(i, b)$ 之间零

相位的数量; n_2 为 $p(i,c)$ 与 $p(i,d)$ 之间零相位的数量; λ 为异常相邻相位的变化率,满足 $\lambda \geq t_1$,可取 $\lambda = 2t_1$ 。(9)式表示相位噪声比两侧相位异常小,(10)式表示相位噪声比两侧相位异常大。算法步骤如下:

1) 遍历数据,找到 $p(i,a)$ 和 $p(i,b)$ 两间断点,统计其零相位数量 n_1 。从 $p(i,a)$ 向左遍历到相位间断点结束,统计非零相位数 α_0 ;从 $p(i,b)$ 向右遍历到相位间断点结束,统计非零相位数 α_1 。

2) 判断 $p(i,c)$ 和 $p(i,d)$ 是否存在,若存在,跳到3),若不存在,跳到4)。

3) 判断(9)式是否成立,若成立,则将 $p(i,b)$ 右边非零相位逐个置零,并更新 $p(i,b)$,直到 $p(i,a) < p(i,b)$ 成立或者 α_1 个非零相位值全被置零为止。判断(10)式是否成立,若成立,则将 $p(i,c)$ 左边非零相位逐个置零,并更新 $p(i,c)$,直到 $p(i,c) < p(i,d)$ 成立或者 α_1 个非零相位值全被置零为止。若都不成立,则跳到4)。

4) 判断 $p(i,a) \geq p(i,b)$ 是否成立,若不成立,则结束。若成立,且 $\alpha_0 \leq \alpha_1$,则令 $p(i,a)$ 左边相位逐个置零,并更新 $p(i,a)$,直到 $p(i,a) < p(i,b)$ 成立为止;若成立,且 $\alpha_0 > \alpha_1$,则令 $p(i,b)$ 左边相位逐个置零,并更新 $p(i,b)$,直到 $p(i,a) < p(i,b)$ 成立为止。

3.2.3 基于线性法的相位补齐

单调法能校正由环境中随机噪声引起的异常相位,但该相位的校正会影响工件信息的完整性,因此有必要对其恢复正确的相位。分析局部连续相位可知,其近似为线性函数。利用这一特点,通过对间断点间斜率、两侧非零相位线性拟合的斜率进行比较、判断和填补,提出了基于线性法的相位补齐方法。基于(5)式,算法步骤如下:

1) 遍历数据,找到 $p(i,a)$ 和 $p(i,b)$ 两间断

点。令 $p_1 = p(i,a)$, $p_2 = p(i,b)$,并统计两间断点间零相位数量 n_1 ,计算两个相邻间断点的斜率 k :

$$k = (p_2 - p_1) / (n_1 + 1). \quad (11)$$

2) 从 $p(i,a)$ 向左遍历到相位间断点结束,对其非零相位进行线性拟合,得斜率 k_1 ;从 $p(i,b)$ 向右遍历到相位间断点结束,对其非零相位进行线性拟合,得斜率 k_2 。求出两斜率的最大值与最小值,假设 $k_1 \leq k_2$ 。

3) 判断 $k_1 \leq k \leq k_2$ 是否成立,若成立,则利用公式 $p(i,a+x) = p(i,a) + x \times k (x=1,2,\dots,n_1)$ 插值填补;反之则结束。

为了保证该方法的完整性,当一行的第一个相位或者最后一个相位为间断点时,直接利用线性法对其进行填补。

4 实验与分析

为验证所提出的相位校正方法,搭建结构光测量系统,如图5(a)所示。该系统由分辨率为 $1024 \text{ pixel} \times 768 \text{ pixel}$ 的EPSON投影仪、两台500 W像素的CMOS(Complementary Metal Oxide Semiconductor)相机和两台计算机等组成,其中,计算机A控制投影仪投射光栅条纹,计算机B控制相机采集条纹并执行校正算法,计算机B的配置均为Intel(R) Core(TM) i5-6500CPU、3.2 GHz、4 GB内存。相机到工件的工作距离为1 m左右。

图5(b)为采集到的待重构木质工件的光栅条纹,投射12幅频率分别为 $1/70$ 、 $1/64$ 和 $1/59$ 的四步相移条纹。分别对三种频率的光栅图像解相,结果类似^[14]。考虑到计算效率,仅对频率为 $1/64$ 的光栅图像的相位进行外差合成与展开,实验结果如图6(a)所示。

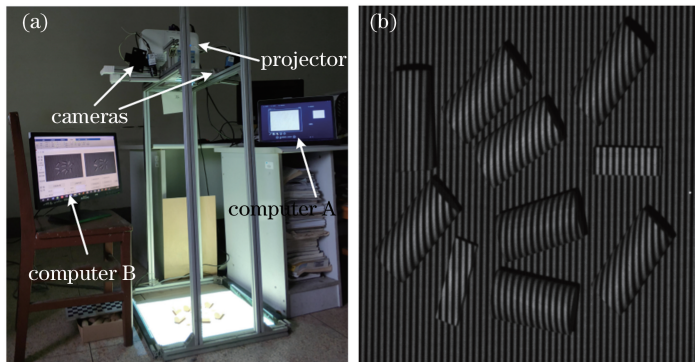


图5 系统搭建与数据采集。(a)结构光测量系统;(b)光栅条纹

Fig. 5 System construction and data collection. (a) Structured light measurement system; (b) grating stripe

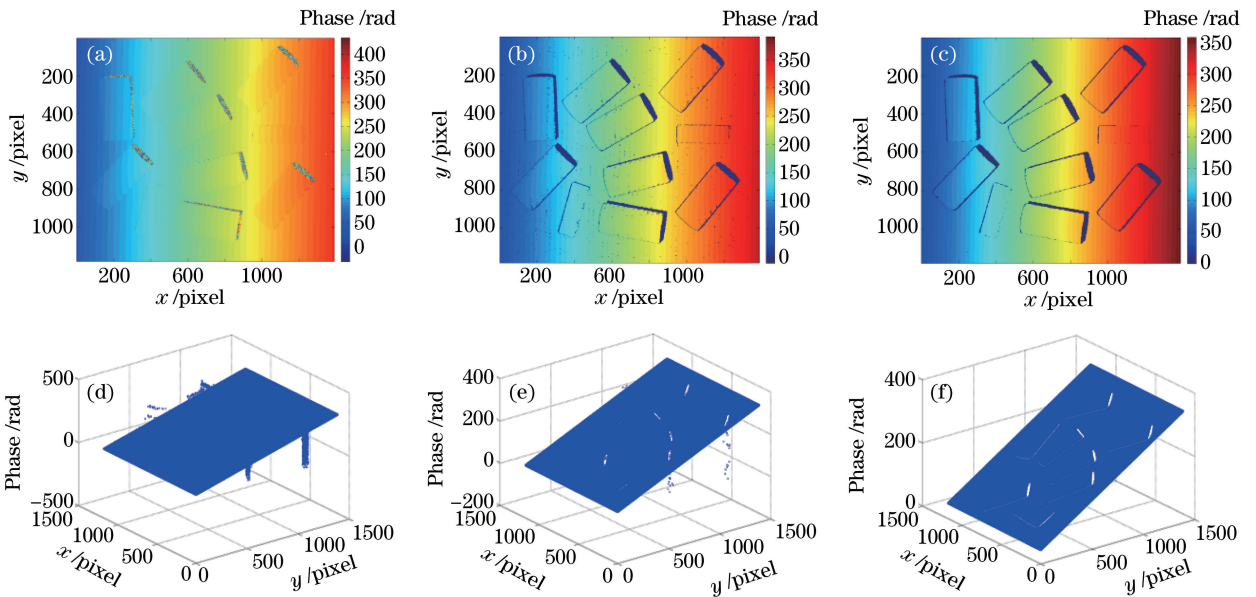


图6 频率为 $1/64$ 的全场连续绝对相位(左相机)。(a)校正前的绝对相位;(b)利用单调法校正后的绝对相位;(c)利用所提方法校正后的绝对相位;(d)校正前的绝对相位高度;(e)利用单调法校正后的绝对相位高度;(f)利用所提方法校正后的绝对相位高度

Fig. 6 Full-field continuous absolute phase at frequency of $1/64$ (left camera). (a) Absolute phase before correction; (b) absolute phase corrected by monotonic method; (c) absolute phase corrected by proposed method; (d) absolute phase height before correction; (e) absolute phase height corrected by monotonic method; (f) absolute phase height corrected by proposed method

利用单调法、所提方法分别对左相机频率为 $1/64$ 的绝对相位进行校正,校正后的结果如图6所示。从图6(a)、(d)可以看出,阴影区的噪声点具有较强的随机性,破坏了相位的单调连续性。从图6(b)、(e)可知,采用单调法校正后仍存在明显的相位噪声,并且还丢失了部分有效相位信息。从图6(c)、(f)可知,利用所提方法进行校正后,几乎没有相位噪声剩余,且填补了工件的部分相位信息,校正后的非零相位单调连续,验证了所提方法的有效性。

表1 5种工件三角片模型的标准偏差

Table 1 Standard deviation of triangular plate model of five kinds of workpieces

Sample	Standard deviation of monotonic method /mm	Standard deviation of proposed method /mm	Relative deviation /%
Wooden cylinder	0.2465	0.0978	60.32
Cuboid block	0.0799	0.0250	68.71
Metal cylinder	0.1768	0.1070	39.48
Plastic bottle	0.1615	0.0944	41.55
Stacked cylinder	0.8552	0.4030	52.88

由表1可知,采用所提方法校正后,木质圆柱体、长方体木块、金属圆柱体、塑料瓶和堆叠圆柱体的三角片模型的标准偏差较单调法分别提高了60.32%、68.71%、39.48%、41.55%和52.88%。在实际仿真中(软件平台为MATLAB R2014a),单调

为验证所提方法的通用性,利用其对获取的相位信息进行校正后,完成木质圆柱体、长方体木块、金属圆柱体、塑料瓶和堆叠圆柱体的三维重构,实验结果如图7所示。由图7可知,5种工件阴影区的相位噪声基本被校正,重构出来的三维点云与原型基本符合,表明所提方法具有良好的通用性。分别采用单调法和所提方法,利用Geomagic Studio软件分析上述5工件的三角片模型的标准偏差,结果如表1所示。

法和所提方法的平均相位校正时间分别约为0.2091 s和0.6252 s。在满足实时性的前提下,所提方法虽然牺牲了部分时间,但重构精度显著提高。以上结果也进一步表明所提方法对不同的实验对象具有良好的通用性。

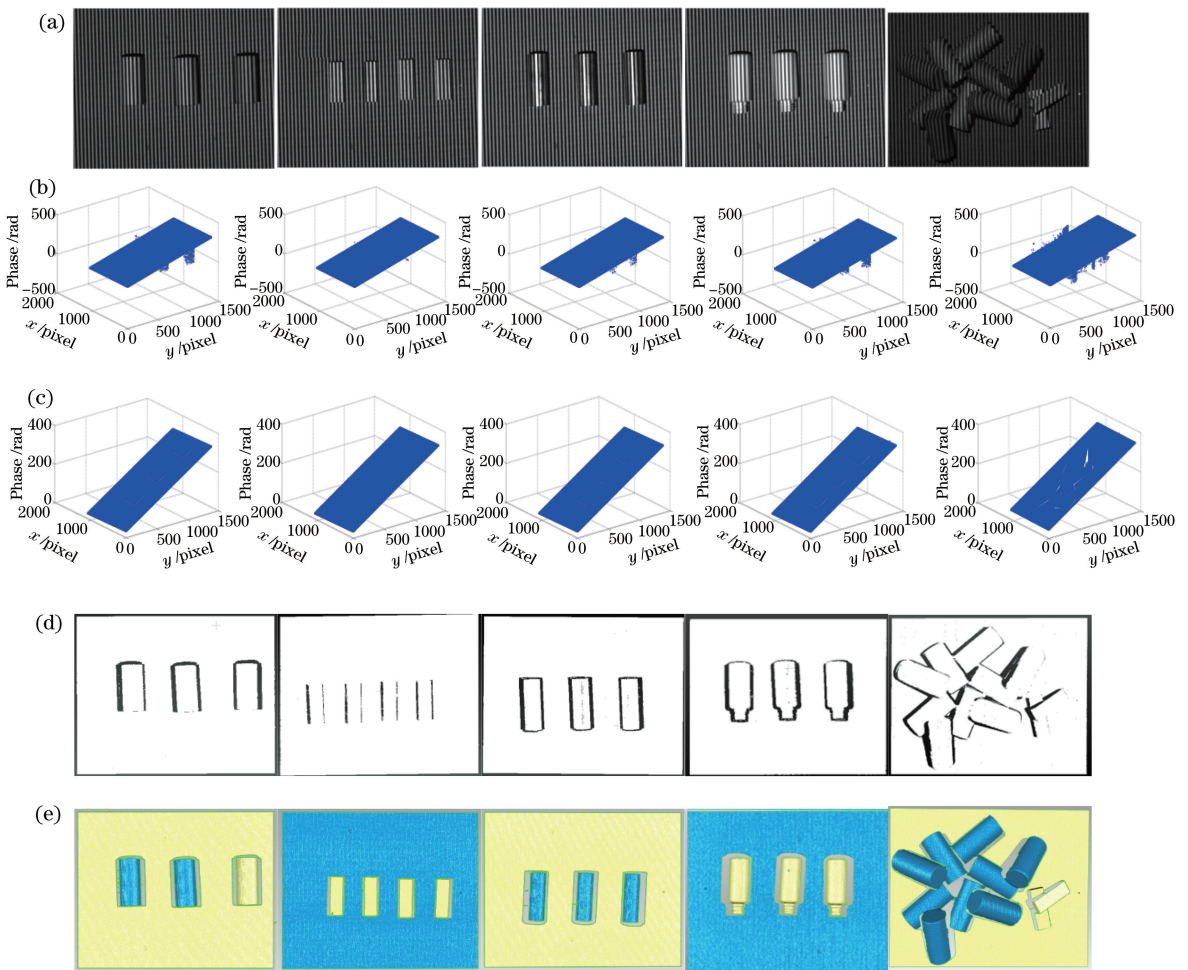


图 7 5 种工件的三维点云与三角片模型。(a)光栅投影;(b)校正前的绝对相位高度(左相机);
(c)利用所提方法校正后的绝对相位高度;(d)三维点云;(e)三角面片模型

Fig. 7 Three-dimensional point cloud and triangular plate model of five kinds of workpieces. (a) Grating projection; (b) absolute phase height before correction (left camera); (c) absolute phase height corrected by proposed method; (d) three-dimensional point cloud; (e) triangular plate model

为验证该方法在散乱堆放圆柱体工件三维重构应用中的准确性,在进行相位校正获得三维点云数据后,利用软件对其中一个圆柱体工件的直径 D 和高 H 分别进行了 5 次拟合,再利用游标卡尺对圆柱

体工件的直径 D 和高 H 进行多次测量,取测量的平均值作为真实值 ($H = 60.06 \text{ mm}$, $D = 29.20 \text{ mm}$),得到的数据结果如表 2 所示。

由表 2 可知,所提的相位校正方法拟合得到的

表 2 圆柱体工件直径和高的拟合结果

Table 2 Fitting results of diameter and height of cylindrical workpiece mm

Index		1 st measure	2 nd measure	3 rd measure	4 th measure	5 th measure
Measured height	Monotonic method	59.8426	60.0841	59.8944	59.8139	60.1214
	Proposed method	59.9655	59.9882	59.9304	60.0113	59.9756
Difference of height	Monotonic method	0.2174	-0.0241	0.1656	0.2461	-0.0614
	Proposed method	0.0945	0.0718	0.1296	0.0487	0.0848
Measured diameter	Monotonic method	29.0768	29.1656	29.3277	29.1317	29.3213
	Proposed method	29.1156	29.2620	29.2753	29.2377	29.1275
Difference of diameter	Monotonic method	0.1232	0.0344	-0.1277	0.0683	-0.1213
	Proposed method	0.0844	-0.062	-0.0753	-0.0377	0.0725

圆柱体的直径和高与真实值之间的平均差值分别为 0.0664 mm 和 0.0859 mm,相较于单调法,分别提

高了 30.11% 和 39.91%，该误差可满足目标抓取的位姿估计要求。

5 结 论

为解决双目视觉三维重构中阴影区相位噪声校正的问题,提出了一种相位校正方法,并得到以下结论:1)为解决单调法存在的相位噪声校正不足的问题,计算了相位频率矩阵中固定区间内非零相位出现的频率,利用相邻间断点的实际相位与预测相位的差值对欠校正的相位噪声进行校正,较单调法的校正更彻底;2)为正确恢复因随机噪声而被置零的部分相位,保证工件信息的完整性,利用线性法进行补齐,有利于提高后续工件位姿估计的准确性。所提方法能有效校正多种情况下阴影区的相位噪声,具有良好的通用性。

参 考 文 献

- [1] Tian Q H, Bai R L, Li D. Point cloud segmentation of scattered workpieces based on improved Euclidean clustering[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2017, 54(12): 121503.
田青华, 白瑞林, 李杜. 基于改进欧氏聚类的散乱工件点云分割[J]. *激光与光电子学进展*, 2017, 54(12): 121503.
- [2] Tang S M, Zhang X, Song Z, et al. Robust pattern decoding in shape-coded structured light[J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2017, 96: 50-62.
- [3] Wu J C, Cao L C, Chen H L, et al. Research progress of texture reconstruction in color three-dimensional scanning[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2018, 55(11): 110004.
吴佳琛, 曹良才, 陈海龙, 等. 彩色三维扫描中纹理重建技术研究进展[J]. *激光与光电子学进展*, 2018, 55(11): 110004.
- [4] Luo J, Wang Y, Yang X, et al. Modified five-step phase-shift algorithm for 3D profile measurement[J]. *Optik*, 2018, 162: 237-243.
- [5] Chen S L, Zhao J B, Xia R B. Improvement of the phase unwrapping method based on multi-frequency heterodyne principle[J]. *Acta Optica Sinica*, 2016, 36(4): 0412004.
陈松林, 赵吉宾, 夏仁波. 多频外差原理相位解包裹方法的改进[J]. *光学学报*, 2016, 36(4): 0412004.
- [6] Liu F, Li J X, Lai J L, et al. Full-frequency phase unwrapping algorithm based on multi-frequency heterodyne principle[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2019, 56(1): 011202.
刘飞, 李佳鑫, 赖俊霖, 等. 基于多频外差的全频解相方法[J]. *激光与光电子学进展*, 2019, 56(1): 011202.
- [7] Petković T, Pribanić T, Đonlić M. Temporal phase unwrapping using orthographic projection[J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2017, 90: 34-47.
- [8] Lü F X, Xing S, Guo H W. Self-correction of projector nonlinearity in phase-shifting fringe projection profilometry[J]. *Applied Optics*, 2017, 56(25): 7204-7216.
- [9] Zuo C, Feng S J, Huang L, et al. Phase shifting algorithms for fringe projection profilometry: a review[J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2018, 109: 23-59.
- [10] Huang Y N, Lou X P. Phase correction and matching based on multi-frequency heterodyne method[J]. *Journal of Applied Optics*, 2014, 35(2): 237-241.
黄亚楠, 娄小平. 基于多频外差原理的相位校正及匹配方法研究[J]. *应用光学*, 2014, 35(2): 237-241.
- [11] Chen L, Deng W Y, Lou X P. Phase unwrapping method base on multi-frequency interferometry[J]. *Optical Technique*, 2012, 38(1): 73-78.
陈玲, 邓文怡, 娄小平. 基于多频外差原理的相位解包裹方法[J]. *光学技术*, 2012, 38(1): 73-78.
- [12] Xiong W, Li W L, Yin Z P. Design and implementation of a stereo matching method in binocular PMP vision measurement [J]. *China Mechanical Engineering*, 2013, 24(19): 2635-2640, 2646.
熊维, 李文龙, 尹周平. 双目 PMP 视觉测量中立体匹配方法的设计与实现[J]. *中国机械工程*, 2013, 24(19): 2635-2640, 2646.
- [13] Reich C, Ritter R, Thesing T. 3-D shape measurement of complex objects by combining photogrammetry and fringe projection[J]. *Optical Engineering*, 2000, 39(1): 224-231.
- [14] Li Z W. Research on structured light 3D measuring technology and system based on digital fringe projection [D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2009.
李中伟. 基于数字光栅投影的结构光三维测量技术与系统研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2009.