

区域判别路径相关解包裹算法

陈人镜^{**}, 许文强, 谭焯宏, 郭宇飞, 丁传厚, 马冬林^{*}

华中科技大学光学与电子信息学院, 湖北 武汉 430074

摘要 在条纹投影三维重构系统中,需要对得到的初始相位进行解包裹才能得到真实的三维图像。路径相关算法是一类十分重要的相位解包裹算法,可以精确无误地还原物体表面的形状和结构,但现有的路径相关算法受相位图噪声的限制,容易在图像质量差或者梯度大处出现奇点,无法找到相应的还原路径。为此,提出一种能够解出精确相位,并且可以忽略噪声点和补偿断层的新颖算法。通过理论分析给出实物图和包裹相位图,然后应用本方法还原出物体的真实相位信息,最后用相位再包裹法作为算法精确度的评估标准,验证本方法的可行性和优越性。

关键词 图像处理; 相位解包裹算法; 结构光法; 条纹投影; 路径相关; Matlab

中图分类号 TH741

文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP56.161007

Path Correlation Phase Unwrapping Algorithm by Regional Judgement

Chen Renjing^{**}, Xu Wenqiang, Tan Yehong, Guo Yufei, Ding Chuanhou, Ma Donglin^{*}

*School of Optical and Electronic Information, Huazhong University of Science and Technology,
Wuhan, Hubei 430074, China*

Abstract In the three-dimensional (3D) reconstruction system for fringe projection, we need to unwrap the original phase to obtain the real 3D image. A path correlation algorithm is a type of useful phase unwrapping algorithm that can accurately rebuild the shape and texture of the target object. However, the path correlation algorithm is limited by the phase noise. Resultantly, we will not find the right path to unwrap the phase when encountering a singular point in the region with low image quality. Therefore, we propose an algorithm that can retrieve exact phase, ignore noise, and compensate fault. Based on a theoretical study, we can provide the actual image of the object and the wrapped phase image, and reconstruct the actual phase information based on the proposed algorithm. To verify the practicability and superiority of this algorithm, the phase rewrapping algorithm is adopted as the performance metric of the algorithm.

Key words imaging processing; phase unwrapping algorithm; structured light method; fringe projection; path correction; Matlab

OCIS codes 100.2000; 100.5088; 100.2650; 100.6890

1 引言

生产力和经济的发展对工业生产中物体的计算机三维(3D)成像的精度和速度提出越来越高的要求,因此急需寻找新的快速三维成像方法。基于结构光法的条纹投影三维成像技术是一种可以快速三维成像的方法,因其具有快速性和较高的准确性而得到广泛关注。

由于用条纹投影图片获取的物体相位是包裹相位,需要进行相位解包裹才能得到代表物体高

度的真实相位,因此合理的相位解包裹算法是成像技术的关键。目前国内外普遍采用的相位解包裹方法分为三种:时间相位展开算法、空间相位展开算法和立体相位展开算法,其中,空间相位展开算法分为路径相关算法和路径无关算法。路径无关算法以最小二乘法及其衍生方法为主,可以在一定程度上快速还原物体结构,平滑噪声。刘景峰等^[1]在 2008 年提出了加权最小二乘法,郭媛等^[2]在 2014 年提出了最小二乘法的改进算法,这些方法都在算法上对噪声点进行了更为复杂的取

收稿日期: 2019-02-19; 修回日期: 2019-02-27; 录用日期: 2019-03-22

^{*} E-mail: madonglin@hust.edu.cn; ^{**} E-mail: u201613835@hust.edu.cn

平均处理,但无法真实还原物体表面细节,仅将对象三维结构进行大致还原,噪声仍对物体的还原精度有影响。路径相关算法是以得到的初始相位为基础进行断层处拼接得到的精确相位,还原度高,具体思路是选取某个处于平滑区域的点沿各个方向的路径向噪声区域进行相位重构,从而还原出完整的物体表面结构,此种方法的关键在于如何找到正确的还原路径。Su等^[3]在2001年提出一种路径相关法,但是对于欠采样区域易出现孤岛。吴禄慎等^[4]在2002年提出新的路径相关算法,但无法解决拉线问题。大部分路径相关算法在有噪声点的情况下或者物体结构过于复杂时失去了还原能力,且可能在某些噪声分布区域出现错误判断^[5]。

为消除噪声影响,还原较复杂物体三维图,本文提出了一种新型的路径相关算法,可以忽略单个噪声点或者一定范围噪声点的影响,得到其他区域精确的三维结构。本文先以理论分析的方式说明此方法的正确性,然后用 Matlab 对存在较多噪声的相位图进行还原,并比较此方法与其他方法还原同一幅图像的还原质量,以验证此方法的可行性和优越性。

2 基本原理

2.1 原理分析

条纹投影成像依照“投影-拍照-三维成像”的工作顺序对物体进行快速三维图构建。成像工作流程如图1所示。

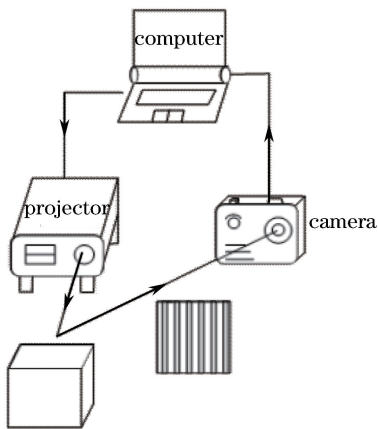


图1 成像工作流程

Fig. 1 Flow chart of imaging

条纹投影后所拍摄的图片的每个像素点的光强包含了照射到该点光波的相位信息,将 $k(k \geq 3)$ 幅条纹投影图片的光强 $I_k(i, j)$ 解方程组,可以得到

像素点的包裹相位信息 $P_{si}(i, j)$ ^[6],其中: i, j 为像素点在图中的宽、高的坐标。得到的相位与物体的实际高度成正比,因此只要得到正确的相位信息即可还原物体的真实高度。但相位经过计算后,得到的是不连续、处于 $(-\pi, \pi]$ 相位的包裹相位图,需要对相位进行解包裹处理才能得到真实的物体三维结构^[1]。

为得到精确的相位展开图,需要对每一个像素点进行相位判断和拼接。由于相位包裹的存在,如果仅仅对相位差距过大的两个点进行还原,则有可能将噪声点当作需要还原的点,造成噪声周围的三维图大幅失真,故需要引入区分还原点和噪声的判别操作。判别操作的具体思想如下:假设计算得到二维的相位矩阵,现在从第一列第一行开始对每一点的相位进行还原,判断条件为其与周围一定区域内点的相位差 δ 是否达到设定的阈值,该区域的范围用半径为 R 的圆确定。在这个圆内的所有点的相位 $P_{si}(m, n)$ 与目标点的相位 $P_{si}(i, j)$ 依次求差得到 $\delta_{m, n-i, j}$,其中: m, n 为除了目标点以外的其他点的宽、高坐标。当有一定数量的点的相位差满足设定的相位差阈值时,将目标点确定为需要进行相位还原的点,对其相位 $P_{si}(i, j)$ 进行 $\pm 2\pi$ 相位补偿,直到其相位与周围点相位相比不再满足还原条件,此时可以判断为此点已还原。原因在于,当某个点与周围一定数量的点的差值超过阈值时,则该点属于断层处点,需要增加或减小其相位;对于位置处于两次或多次断层之后的点则需要两次或多次增加或减小其相位,以此来校正其与周围点的相位差;而对于噪声点,周围与其相位相差过大的点达不到规定数量,因此不对其进行还原操作。以此类推,可以将所有点依次进行还原,最终忽略噪声点的影响。

在某些情况下,由于还原的顺序是按特定顺序进行的,还原时遇到噪声点和边界后还原路径便很难找到,需要对相位矩阵进行重复转置还原。读取条纹投影图片信息得到坐标 (w, h) 的初始相位 $P_{si}(w, h)$,其中: h 是相位矩阵的高; w 是相位矩阵的宽。首先对点相位 $P_{si}(1, 1) \sim P_{si}(1, h)$ 按顺序进行还原,然后对 $P_{si}(2, 1) \sim P_{si}(2, h)$ 按顺序进行还原,以此类推,直到还原 $P_{si}(w, 1) \sim P_{si}(w, h)$ 。由于在某个噪声点 $P_{si}(i, j)$ 还原条件判断错误,影响了后续的还原,使还原出现非正常的悬崖。这时对相位矩阵进行转置,对于需要将宽度坐标 $1 \sim w$ 进行转置的情况,即执行操作 $P_{si}(s, k) = \varphi$; $P_{si}(s, k) = P_{si}(w-s, k)$; $P_{si}(w-s, k) = \varphi$;

$s \in (1, w/2)$, 其中: s, k 为进行转置时像素点的宽、高坐标。然后按原来的操作顺序重复操作, 即可得到完整精确且忽略了噪声影响的三维图像。

在普通的路径相关算法中, 当某一区域噪声点过多时, 还原路径受到干扰, 易出现还原无法正确进行或者还原错误的情况。但在区域判别法中, 满足还原条件的点需要其附近一定范围内的点均满足还原条件才会对点进行还原, 因此大幅减少了噪声点导致的错误还原。这里要说明的是, 尽管区域判别法仍然会出现一次还原不完全的现象, 但是相比其他方法因噪声而产生的不可恢复性误差相比(如大量拉线和孤岛), 本文的方法由于区域判别的作用极大地削弱了奇点的影响, 不会出现大量的拉线和断层, 而一次未能还原的部分将会在中断还原的地方寻找正确的还原路径继续进行还原。

2.2 算法

假设读取 $w \times h$ 个像素点的矩形图片, 得到初始相位矩阵 $P_{si}(i, j)$ 。其中: $i = 1, 2, 3, \dots, w; j = 1, 2, 3, \dots, h$ 。定义区域判别半径 R , 从 $i = 1, j = 1$ 开始, 按行或列开始逐点还原。对还原点 (i, j) 周围满足

$$\sqrt{(m-i)^2 + (n-j)^2} < R, \quad (1)$$

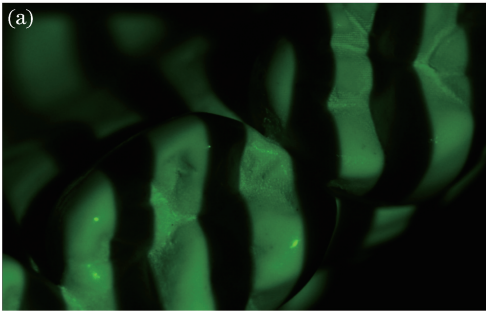
的点 (m, n) , 将其选为需要进行比较的点, 执行以下操作。

1) 定义需要进行比较的点 (m, n) 与还原点 (i, j) 的相位差 $\delta_{m,n-i,j}$ 为

$$\delta_{m,n-i,j} = P_{si}(m, n) - P_{si}(i, j)。 \quad (2)$$

定义判别矩阵 $\mathbf{J}(i, j) = 0$, 判别精度 a , 当满足条件 $\delta_{m,n-i,j} > 2\pi - a$ 时执行

$$\mathbf{J}(i, j) = \mathbf{J}(i, j) + 1。 \quad (3)$$



2) 定义还原判别临界值 N , 当计数完成时, 对满足条件

$$J(i, j) > N, \quad (4)$$

的点确定其为需要进行还原的点, 对于不满足(4)式条件的点视为噪声点或无需还原的点, 跳过以下步骤。

3) 记录下最后一个满足(2)式的点的相位值 $P_{si}(m, n)$, 记为 $P_{si}(p, q)$, p, q 为此点的宽、高坐标, 满足

$$p = m, q = n。 \quad (5)$$

4) 对于满足

$$P_{si}(p, q) - P_{si}(i, j) > 2\pi - a, \quad (6)$$

的点 (i, j) 进行加 2π 还原操作

$$P_{si}(i, j) = P_{si}(i, j) + 2\pi。 \quad (7)$$

重复进行步骤 4), 直至不再满足(6)式条件。对每一个点执行(1)~(7)式的循环过程, 直至所有点完成还原。

若图形过于复杂, 一次还原后的相位图与实际图形相比有一定部分未能还原(出现梯形悬崖)可以选择重复还原操作, 或将行或列进行转置后再进行一次或多次还原。

3 实例与分析

针对某一具有噪声特性的条纹投影图片, 基于上述方法用 Matlab 进行还原。条纹投影与相位图如图 2 所示。读取照片相位信息为 $w = 1024, h = 768$ 的矩阵。需要说明的是, 在读取像素点灰度信息的过程中, 在 Matlab 中得到的是高度坐标被转置的包裹相位图, 这并不影响相位解包裹过程, 真实图像只需要对高度坐标再进行一次转置即可。

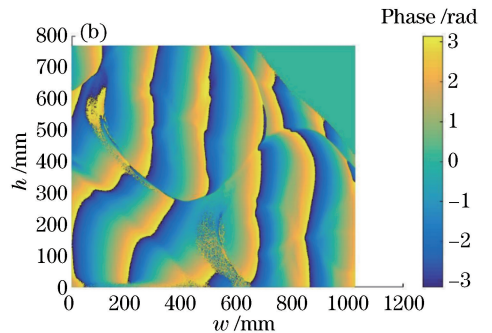


图 2 条纹投影图片与初始相位图。(a) 条纹投影牙齿照片; (b) 初始相位图

Fig. 2 Fringe projection picture and original phase image. (a) Fringe projection picture of teeth; (b) original phase image

第一次设定判别半径 $R = 1, a = 0.1, N = 1$, 即需要和中心点比较的点只有前后左右 4 个点, 这是

为了初步粗略还原图像, 提高运行速度。第一、二次还原图如图 3 所示。

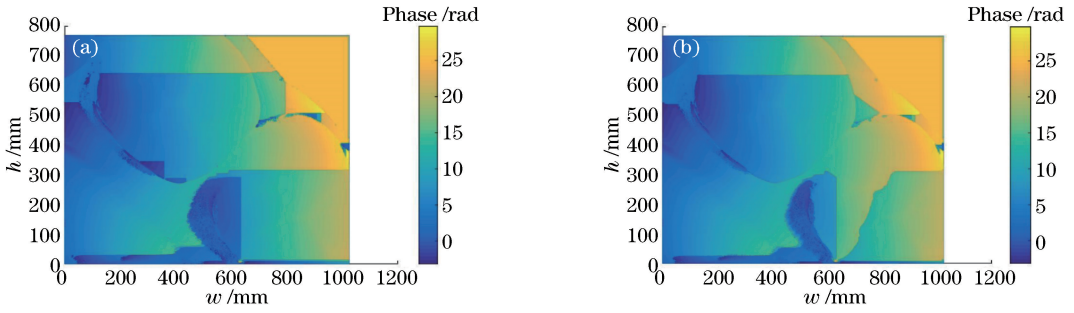


图 3 两次还原结果。(a)一次还原相位图；(b)二次还原相位图

Fig. 3 Results of twice reconstruction. (a) Phase image of first time reconstruction; (b) phase image of second time reconstruction

第二次设定 $R = 6$ 、 $N = 8$ ，提高还原的准确度，其他条件不变。将图像高度坐标转置，重复上述操作，得到还原图如图 4 所示。

在根据实际情况多次进行以上操作后，对图像进行背景消除和减去斜面相位等操作，得到最终完整的还原图如图 5 所示。

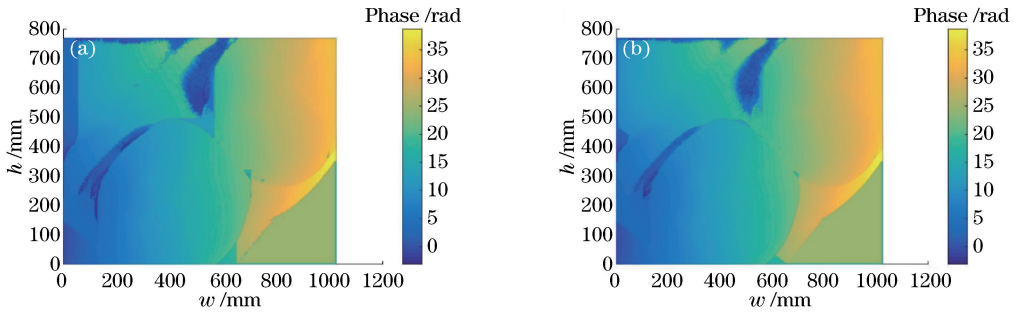


图 4 转置后的两次还原结果。(a)三次还原相位图；(b)四次还原相位图

Fig. 4 Results of twice reconstruction after transposition. (a) Phase image of third time reconstruction; (b) phase image of fourth time reconstruction

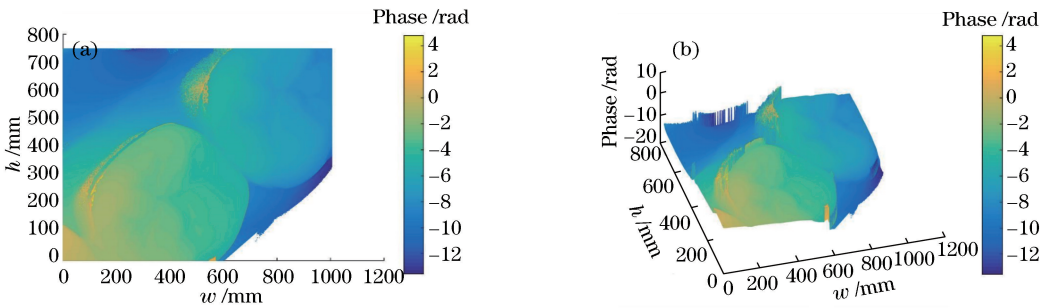


图 5 最终还原结果。(a)最终还原顶视图；(b)最终还原三维图

Fig. 5 Final results. (a) Top view of final result; (b) 3D image of final result

可以看出，在多次还原后，除无限深阴影空间和投影被遮挡的区域外，其他部分均可完整、清晰、连贯还原。由于噪声区域被识别出来且未参与还原，噪声无法影响其他正常点，因此噪声点被忽略，而正常点可以沿其他路径正常还原。但为了得到完全还原的三维图像，对同一幅图进行多次循环判别，因此会成倍地增加运行时间，这是本算法的不足之处。在针对不同复杂程度的物体时，应该调整算法的操作次数，对于简单、无复杂断层的图形，只需要一次还原操作

即可；针对特殊的物体图像则需要根据上一次的还原效果进行多次转置与还原操作。尽管这会增加运行时间，但是可以确保物体被完整还原。对于相同复杂程度的物体，其他算法尽管可以快速重构物体三维图像，但相似度势必会下降。这在本质上是以牺牲运算时间为代价来还原物体真实表面的方法。

对同样的初始相位图，使用最小二乘法和加权最小二乘法对其进行还原^[1,4]。最小二乘法还原图如图 6 所示。加权最小二乘法还原图如图 7 所示。

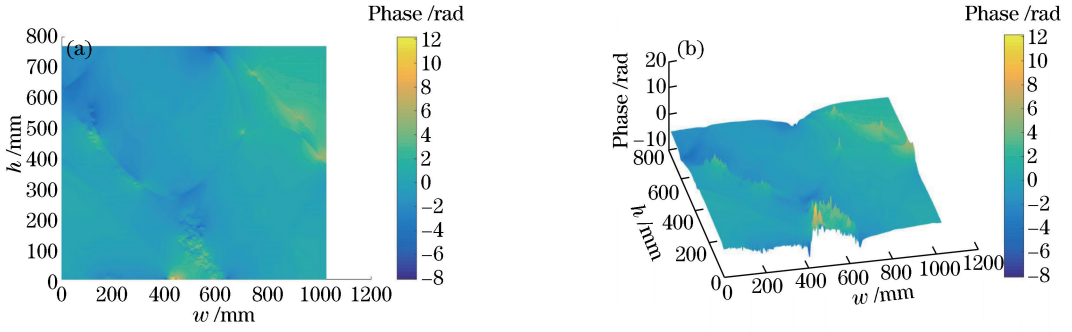


图 6 最小二乘法还原结果。(a)最小二乘法还原顶视图;(b)最小二乘法还原三维图

Fig. 6 Results of least square method. (a) Top view rebulid by least square method; (b) 3D image rebulid by least square method

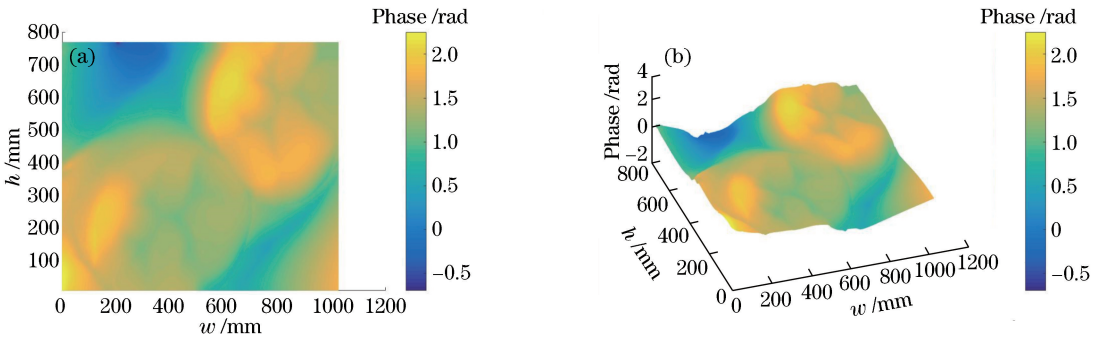


图 7 加权最小二乘法还原结果。(a)加权最小二乘法还原顶视图;(b)加权最小二乘法还原三维图

Fig. 7 Results of weighted least square method. (a) Top view rebulid by weighted least square method; (b) 3D image rebulid by weighted least square method

使用相位再包裹法^[7]作为还原精确度的评估标准。相位再包裹法即将已完成解包裹的相位图进行再包裹,将相位进行加减 $2M\pi$ 操作, M 为整数,使相位限定在 $-\pi \sim \pi$ 之间。将再包裹相位与原包裹

相位进行对比,即可看出解包裹结果是否准确。

原包裹相位图和区域判别法、最小二乘法、加权最小二乘法进行再包裹的相位图如图 8、图 9 和图 10 所示。

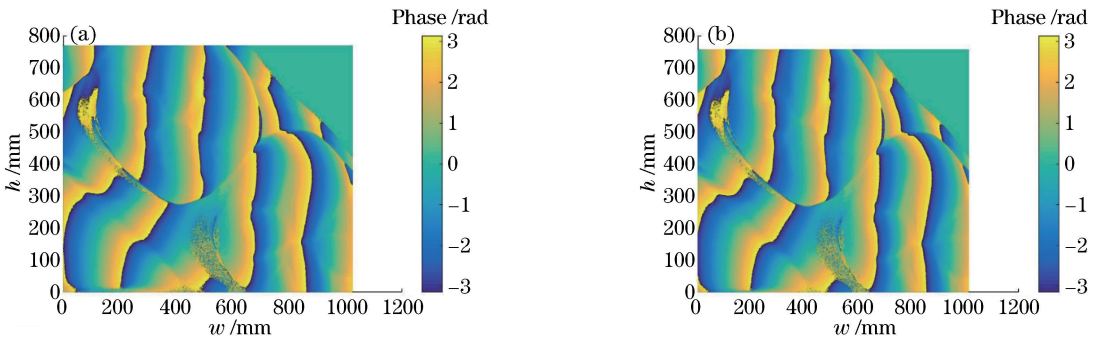


图 8 原包裹相位图与区域判别法再包裹相位图。(a)原包裹相位图;(b)区域判别法再包裹相位图

Fig. 8 Wrapped phase image and rewrapped phase image of regional judgement. (a) Wrapped phase image; (b) rewrapped phase image of regional judgement

由图 8 的原包裹相位图和区域判别法得到的再包裹相位图可以看出,两者并无明显差别。这是因为区域判别法直接忽略了噪声点,寻找没有噪声的路径进行还原,所得到的都是由光强度直接计算得到的原相位或者原相位加上或减去 $2M\pi$ 的相位,大

幅提高了三维成像质量。

由图 9 可以看出,原包裹相位图与最小二乘法得到的再包裹相位图差别很大,说明采用最小二乘法得到的解包裹相位图丢失了许多原有信息,还原效果差。由图 6 也可看出,普通最小二乘法对于含

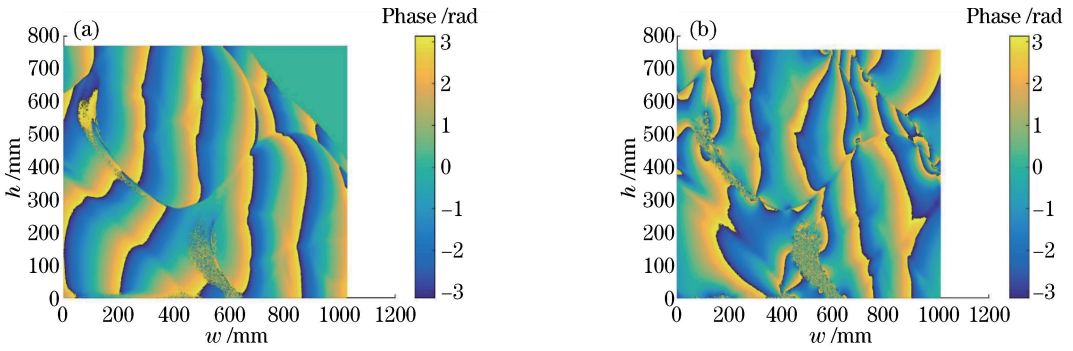


图9 原包裹相位图与最小二乘法再包裹相位图。(a)原包裹相位图;(b)最小二乘法再包裹相位图

Fig. 9 Wrapped phase image and rewrapped phase image of least square method. (a) Wrapped phase image; (b) rewrapped phase image of least square method

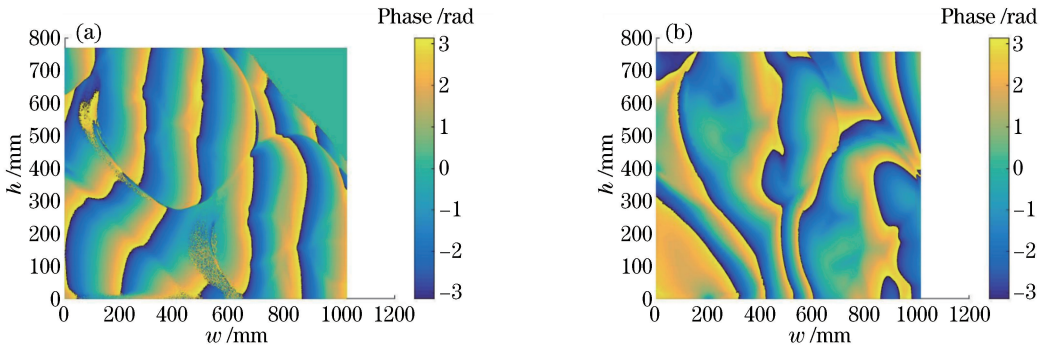


图10 原包裹相位图与加权最小二乘法再包裹相位图。(a)原包裹相位图;(b)加权最小二乘法再包裹相位图

Fig. 10 Wrapped phase image and rewrapped phase image of weighted least square method. (a) Wrapped phase image; (b) rewrapped phase image of weighted least square method

有噪声的复杂结构物体,仅还原物体的大体轮廓,无法还原真实相位,并且仍含有圆锥状尖点。

由图7和图10可知,加权最小二乘法在一定程度上完好地还原了物体真实高度,噪声非正常相位的巨大差值被周围的正常点平均分担。但是噪声对周围点的影响是有扩散性的,这导致还原图与实际物体相比,物体细节和纹理被弱化,正常的高度落差和峭壁被虚化,还原精确度大幅下降,其再包裹相位图与原包裹相位图仍有较大差异。

再用量化数据对三种方法的还原精确度进行对比分析。将三幅再包裹相位图分别与原包裹相位图的对应像素点的相位求绝对差值,得到三种方法的误差矩阵。误差矩阵中元素的平均值即误差平均值,误差矩阵中元素的标准差即误差标准差。利用Matlab计算得到区域判别法、最小二乘法、加权最小二乘法的误差平均值和误差标准差如表1所示。

由表1可知,相比于最小二乘法和加权最小二乘法,区域判别法的误差平均值和误差标准差都远小于另两种方法。这表明以路径跟踪算法为基础

表1 误差矩阵的误差平均值与误差标准差

Table 1 Error average value and error standard deviation of error matrix

Comparison	Phase Unwrapping Algorithm	Least Square Method	Weighted Least Square Method
Average value of error Standard deviation of error	0.005	1.7555	2.0238
	0.1765	2.9331	3.1703

的区域判别法具有更高的还原精度,在要求精确还原物体表面的情况下对误差的处理更为合理。

对其他结构简单的物体,使用区域判别法仅进行一次最简单的还原操作即可得到快速精确的还原三维图像。原图和还原效果图如图11、图12、图13所示。

4 结 论

在相位解包裹的两种算法中,路径相关算法可以精确地还原物体结构,但易受噪声点等不良

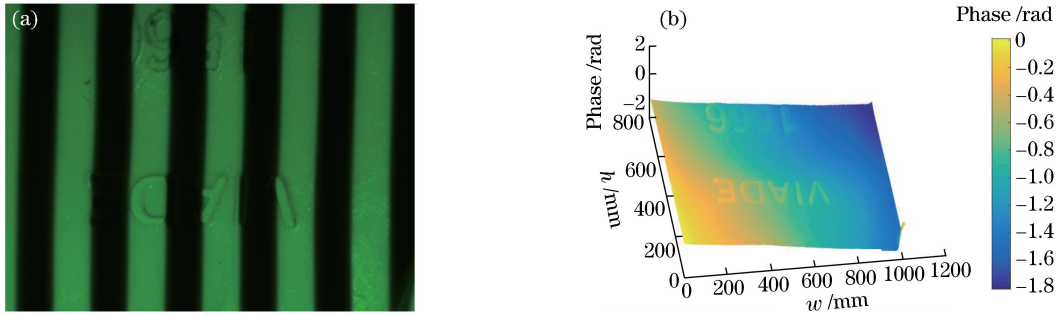


图 11 例一。(a)条纹投影原图;(b)还原三维图

Fig. 11 First case. (a) Fringe projection picture; (b) rebuilt 3D image

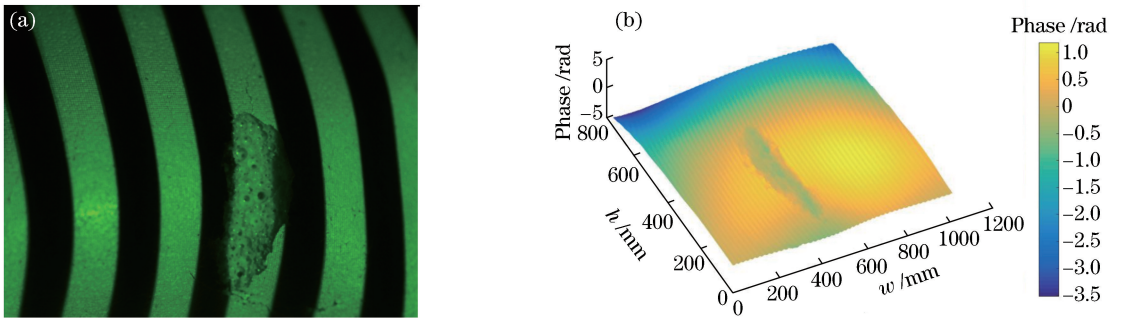


图 12 例二。(a)条纹投影原图;(b)还原三维图

Fig. 12 Second case. (a) Fringe projection picture; (b) rebuilt 3D image

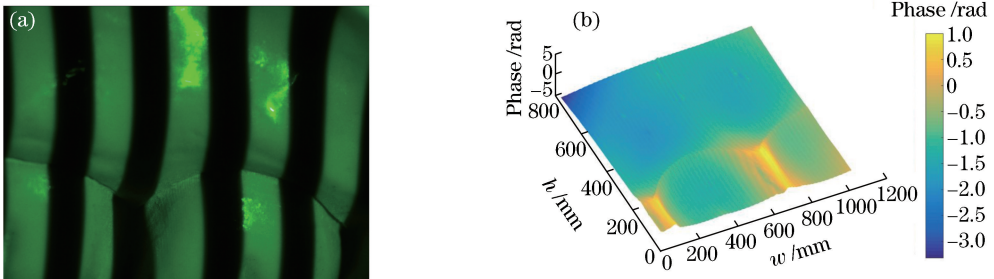


图 13 例三。(a)条纹投影原图;(b)还原三维图

Fig. 13 Third case. (a) Fringe projection picture; (b) rebuilt 3D image

因素的影响。以最小二乘法为主的路径无关算法虽然可以平滑部分噪声,整体还原物体三维结构,但还原精确度受噪声点的影响,噪声越多,误差越大,且误差会向周围传递。为此,提出了一种可以忽略噪声点,精确还原物体三维结构和表面纹理的方法。在有单噪声点或者集束噪声点存在时,为了使噪声不对其周围点的还原产生影响,用点的区域判别方式对噪声点和正常点进行区别,仅仅对满足条件的点进行还原操作。对于一般的相位高度能够成片连续的相位图,此方法可以快速、精确地得到三维图像,且精确度只与照片的像素点密度相关。像素点越密集的照片,三维物体的精确度和平滑度越高。在物体结构复杂、起伏和断崖较多、噪声点较多的情

况下,则需要较长的运算时间来获取忽略噪声点的精确三维还原图像。

区域判别法中的 R 、 a 、 N 值需要根据具体情况确定。判别半径 R 越大,对每一点需要进行区域判别的周围点就越多,判断的正确率也会提高,物体边界的平滑度和精度也随之提高,但运算速度随之下降。由于处于 2π 相位断层处的两个点不会严格相差 2π ,又必须与噪声点相区分,设置了精确度 a ,其值与像素点密度、物体斜面梯度相关。 N 的值与噪声密度和 R 值有关,需要根据实际情况设定。

区域判别法的主要作用在于区别噪声点和差 2π 断层点,这也是许多其他路径相关算法无法解决的问题。这可以在质量图法或者是枝切法中得到应

用。在得到忽略了噪声点的高精度三维还原图后,通过对噪声点进行滤除或者使用最小二乘法进行区域性的平滑,即可得到更加完善的三维图像。

参 考 文 献

- [1] Liu J F, Li Y Q, Liu K. Weighted least-square phase unwrapping algorithm for noisy phase-map [J]. *Optical Technique*, 2008, 34(5): 643-646, 650.
刘景峰, 李艳秋, 刘克. 含噪声包裹相位图的加权最小二乘相位展开算法研究[J]. *光学技术*, 2008, 34(5): 643-646, 650.
- [2] Guo Y, Chen X T. Study of improved phase unwrapping algorithm based on least squares [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2014, 41(5): 0508005.
郭媛, 陈小天. 基于最小二乘相位解包裹改进算法的研究[J]. *中国激光*, 2014, 41(5): 0508005.
- [3] Su X Y, Xue L. Phase unwrapping algorithm based on fringe frequency analysis in Fourier-transform profilometry[J]. *Optical Engineering*, 2001, 40(4): 637-643.
- [4] Wu L S, Ren D, Wu K. New region-growing algorithm for phase unwrapping[J]. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, 2002, 38(s1): 126-130.
吴禄慎, 任丹, 吴魁. 一种新的区域增长相位去包裹算法[J]. *机械工程学报*, 2002, 38(s1): 126-130.
- [5] Qian X F, Rao F, Li X H, *et al.* Accurate least-squares phase unwrapping algorithm [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2012, 39(2): 0209001.
钱晓凡, 饶帆, 李兴华, 等. 精确最小二乘相位解包裹算法[J]. *中国激光*, 2012, 39(2): 0209001.
- [6] Zhang S, van der Weide D, Oliver J. Superfast phase-shifting method for 3-D shape measurement [J]. *Optics Express*, 2010, 18(9): 9684-9689.
- [7] Liu W. Research of phase unwrapping algorithm and its application in phase measurement profilometry [D]. Taiyuan: North University of China, 2016: 19-25.
刘稳. 相位解包裹算法及在相位测量轮廓术中的应用研究[D]. 太原: 中北大学, 2016: 19-25.