

文章编号 1004-924X(2024)08-1252-09

相位测量的不连续位置自适应分割

邓高旭¹, 刘梓豪¹, 柯俐颖², 周诗洋³, 马立东^{1*}

- (1. 太原科技大学 机械工程学院, 山西 太原 030024;
2. 威海德生技术检测有限公司 计量校准中心, 山东 威海 264200;
3. 武汉科技大学 机械自动化学院, 湖北 武汉 430081)

摘要: 为了消除不连续位置对基于相位测量轮廓术三维重建精度的影响, 提出了一种相位测量的不连续位置自适应分割方法。对该方法所采用的基于自适应方向相干性的相位不连续分割算法进行研究。首先, 采用自适应方向相干图和平滑相位图确定不连续位置, 即获得不连续区域与连续区域的灰度映射图。接着, 将灰度映射图后处理为使用 0-1 表示的不连续区域与连续区域的掩码图。最后, 将掩码图作为加权最小二乘相位展开方法的权重图将相对相位展开为绝对相位, 所求解权重主要用以衡量包裹相位图中每个像素位置相位的质量。仿真结果表明: 该自适应方向相干法对噪声方差为 0.8 的包裹相位图中直线和矩形不连续位置的分割平均误差分别为 1.678 3 和 3.000 2 个像素。实际相位测量轮廓实验也证明所提出方法可以有效分割包裹相位图不连续位置。所提出方法可实现对不连续位置的自适应分割以用于高精度的三维重建。

关键词: 机器视觉; 加权最小二乘; 不连续分割; 掩码图; 自适应后处理

中图分类号: TP394.1 **文献标识码:** A **doi:** 10.37188/OPE.20243208.1252

Adaptive Discontinuity Segmentation in Phase Measurement

DENG Gaoxu¹, LIU Zihao¹, KE Liying², ZHOU Shiyang³, MA Lidong^{1*}

- (1. School of Mechanical Engineering, Taiyuan University of Science and Technology,
Taiyuan 030024, China;
2. Metrology Calibration Center, Weihai Desheng Technology Testing Co., Ltd.,
Weihai 264200, China;
3. School of Mechanical Automation, Wuhan University of Science and Technology,
Wuhan 430081, China)

* Corresponding author, E-mail: mald@tyust.edu.cn

Abstract: To mitigate the impact of discontinuous positions on the accuracy of three-dimensional reconstruction using phase measurement profilometry, we introduced an adaptive segmentation method. This method was based on phase measurement and employed a phase discontinuity segmentation algorithm utilizing adaptive orientation coherence. Initially, we employed the adaptive orientation coherence map and the smooth phase map to identify discontinuous positions, that was, the grayscale map of the discontinuous area and the continuous area was obtained. Subsequently, the grayscale map was processed into a bi-

收稿日期: 2023-10-16; 修订日期: 2023-12-01.

基金项目: 国家自然科学基金面上项目 (No. 52274389); 博士科研启动基金 (No. 20222137)

nary mask, representing discontinuous areas as 0 and continuous areas as 1. Lastly, this mask map served as a weight map in the weighted least squares phase unwrapping method to convert the relative phase into an absolute phase. The resulting weight primarily assessed the phase quality at each pixel position within the wrapped phase map. The simulation results show that the segmentation mean errors of the adaptive orientation coherence method for discontinuities of straight lines and rectangles in the wrapped phase map with noise variance of 0.8 are 1.678 3 and 3.000 2 pixels, respectively. The actual experiment also proves that the proposed method can effectively segment the discontinuities for high-precision 3D reconstruction.

Key words: machine vision; weighted least squares; discontinuity segmentation; mask map; adaptive post-processing

1 引言

结构光系统的三维重建采用相位测量轮廓术编码方法,准确地将包裹相位展开为绝对相位也是提高三维重建精度的关键^[1-2]。相位中包含着被测物体的深度信息,且深度信息被分割在周期性的包裹相位中。将深度信息从多个包裹相位周期中恢复成为一个周期的相位就显得很重要,该恢复过程也称为相位展开或相位解包裹。空间相位展开算法可以直接对包裹相位图进行展开,主要判断相邻像素间的相位值是否存在于同一个包裹周期内。由于被测物体表面形貌比较复杂,即使同一包裹相位周期内相邻像素的相位也并非连续,这就使得包裹相位周期内出现相位不连续。相位不连续位置会引起相位值产生急剧的变化,如果该相变超出了包裹周期跳变处相位差值,该不连续位置就会被当作周期跳变被展开,这将导致空间相位的展开发生错误^[3-4]。因此,能够在包裹相位展开前对不连续位置进行识别和分割是获取准确展开相位的前提。

由于被测物体存在复杂的表面,包裹相位会出现不连续位置。如果包裹相位图中同时存在噪声和不连续性,情况就非常具有挑战性^[5-13]。空间相位展开方法分为三类:局部区域算法、路径跟随算法和全局区域算法(最小范数法)。路径跟随算法的基本原理是沿着适当的路径进行相位积分,主要是为了避免由于包裹的相位数据的不可靠性而引起的误差。一些方法如下^[4]: Goldstein的分支切割算法、质量引导算法、Flynn的最小不连续性算法和区域增长算法。最小范

数算法是一种全局函数最小化相位展开算法。Ghiglia等人提出了加权和非加权最小二乘相位展开算法。未加权最小二乘法直接使用FFT和离散余弦变换来求解,不能有效地区分相位质量。对于加权最小二乘相位展开算法(Weighted Least Squares, WLS),崔等人^[14]通过结合相位拉普拉斯梯度和统计方法引入了一种新的质量图,该方法使用其四个相邻像素将每个像素的相位梯度转换为相位拉普拉斯梯度。钱等人^[15]提出了一种蛇形辅助质量引导的相位展开算法,该算法使用基于窗口傅里叶变换(Windowed Fourier Transform, WFT)的方法获得有效的质量度量。实验表明,该方法可以在不连续处获得良好的展开结果。针对带噪声的不连续条纹图案,^[16]中提出了一种基于局部方向相干性的条纹分割方法,该方法与边界感知相干增强扩散相结合。此外,^[17]中描述了基于钱^[16]的完整解决方案,用于处理不连续相位展开问题。为了解决弱全局噪声问题,Yan等人^[18]提出了一种基于可靠性掩码的WLS相位展开算法。对于不同的图案,进行了多次试验以确定适当的阈值。受^[16]的局部方向相干性的启发,Li等人^[19]提出了一种使用方向相干性作为权重掩码的加权最小二乘相位展开算法。值得强调的是,Li在他的研究中提供了经验阈值^[19]。

因此,对于噪声存在时阈值的启发式选择研究方法都有一个共同点,即需要通过多次手动试验获得适当的阈值。针对该阈值选取问题,本文提出了基于自适应方向相干性的相位不连续分割算法。该方法利用自适应方向相干图生成不

连续区域与连续区域的灰度映射图。通过将灰度映射图后处理双边滤波、结构纹理分解与平滑 (Structure-texture Decomposition and Smoothing, STDS)^[20]和数值标记的后处理,生成 0-1 表示不连续区域与连续区域的掩码图,并将其作为加权系数带入加权最小二乘法来展开相位。实验证明该自适应方向相干法可以准确分割出相位中的不连续位置,消除了不连续位置的错误相位展开误差。

2 加权最小二乘相位展开

在相位测量轮廓术中,所获得的相位图的值域为 $[-\pi, \pi]$,而真实相位是连续的,因此需要将包裹后的相对相位展开为连续的绝对相位。空间相位展开法则是通过包裹相位图所具有的结构特性和相邻点的空间特征对包裹相位进行快速地展开。

在离散点图中,包裹相位 $\varphi_{i,j}$ 与其展开相位 $\phi_{i,j}$ 之间的关系^[4]表示为:

$$\begin{aligned} \varphi_{i,j} &= \phi_{i,j} + 2\pi c_{i,j} = \text{Wrap}(\phi_{i,j}) \\ -\pi < \phi_{i,j} \leq \pi, i &= 0, \dots, M-1, j = 0, \dots, N-1, \end{aligned} \quad (1)$$

其中:整数倍 $c_{i,j}$ 是包裹数, $\text{Wrap}(\cdot)$ 是包裹运算符, i 和 j 分别是水平和垂直像素坐标, M 和 N 分别是相位图像的水平 and 垂直尺寸。

为了消除无效像素对不连续相位空间展开的影响, Ghiglia 等人^[4]提出了一种基于加权最小二乘 (Weighted Least Squares, WLS) 的相位展开方法。WLS 相位展开是通过在水平和垂直方向上找到真实相位差和包裹相位差 $\Delta_{i,j}^x$ 之间的最小二乘解实现的,表示为:

$$\min \left\{ \sum_{i=0}^{M-2} \sum_{j=0}^{N-1} U_{i,j} (\phi_{i+1,j} - \phi_{i,j} - \Delta_{i,j}^x)^2 + \sum_{i=0}^{M-1} \sum_{j=0}^{N-2} V_{i,j} (\phi_{i,j+1} - \phi_{i,j} - \Delta_{i,j}^y)^2 \right\}, \quad (2)$$

其中, $\Delta_{i,j}^x$ 和 $\Delta_{i,j}^y$ 被表示为:

$$\begin{aligned} \Delta_{i,j}^x &= \text{Wrap}(\phi_{i+1,j} - \phi_{i,j}), \\ i &= 0, \dots, M-2, j = 0, \dots, N-1, \\ \Delta_{i,j}^y &= \text{Wrap}(\phi_{i,j+1} - \phi_{i,j}), \\ i &= 0, \dots, M-1, j = 0, \dots, N-2 \end{aligned} \quad (3)$$

$U_{i,j}$ 和 $V_{i,j}$ 是权重系数,表示为:

$$\begin{aligned} U_{i,j} &= \min(w_{i+1,j}^2, w_{i,j}^2) \\ V_{i,j} &= \min(w_{i,j+1}^2, w_{i,j}^2), \end{aligned} \quad (4)$$

其中, $w_{i,j}$ 是权重掩码。一般地,权重掩码是代表连续和不连续位置的 0-1 二值图像,表示为:

$$w_{i,j} = \begin{cases} 1 & \theta_{i,j} \geq r \\ 0 & \theta_{i,j} \leq r \end{cases}, \quad (5)$$

其中: $\theta_{i,j}$ 是包裹相位图像的方向图, r 是分割阈值。

公式(2)可以简化为以下具有 Neumann 边界条件的离散泊松方程:

$$\begin{aligned} U_{i,j}(\phi_{i+1,j} - \phi_{i,j}) - U_{i-1,j}(\phi_{i,j} - \phi_{i-1,j}) + \\ V_{i,j}(\phi_{i,j+1} - \phi_{i,j}) - U_{i,j-1}(\phi_{i,j} - \phi_{i,j-1}) = q_{i,j}, \end{aligned} \quad (6)$$

其中, $q_{i,j}$ 是加权的相位拉普拉斯,表示为:

$$q_{i,j} = U_{i,j} \Delta_{i,j}^x - U_{i-1,j} \Delta_{i-1,j}^x + V_{i,j} \Delta_{i,j}^y - V_{i,j-1} \Delta_{i,j-1}^y. \quad (7)$$

加权最小二乘等式可以用简单的矩阵运算描述,即:

$$\mathbf{Q}\phi = \mathbf{c}, \quad (8)$$

其中: \mathbf{Q} 是作用于加权相位差上的修正离散拉普拉斯运算的矩阵, \mathbf{c} 是由加权包裹相位差的修正离散拉普拉斯形成的向量。

公式(7)不能通过简单傅里叶或余弦变换直接求解,只能通过迭代的方式。公式(6)所示的 WLS 相位展开求解问题可以通过离散余弦变换的方法和预条件共轭梯度 (Preconditioned Conjugate Gradient, PCG) 的方法求解。相比而言, PCG 算法的收敛速度更快。

该算法需要三个数组存储残差向量、前置条件向量和共轭梯度离散向量^[14]的 PCG 算法用于二维加权最小二乘相位展开。

二进制加权系数可以准确地反映相位质量,但是需要多次迭代才能获得令人满意的加权最小二乘结果。因此,求得的权重掩码就可以在相位展开过程中区分噪声较大的相位区域及不连续相位区域。

3 自适应方向相干性掩码计算

3.1 不连续对相位展开的影响

包裹相位图案具有特殊的条纹结构信息,即相位值在包裹相位区域内连续变化,而在整

个相位区域是周期性变化。如果不区分突变相位区域和连续相位区域,相位突变会导致包裹相位在突变处被错误地展开。以一维不连续相位的展开为例来说明不连续位置对相位展开的影响。

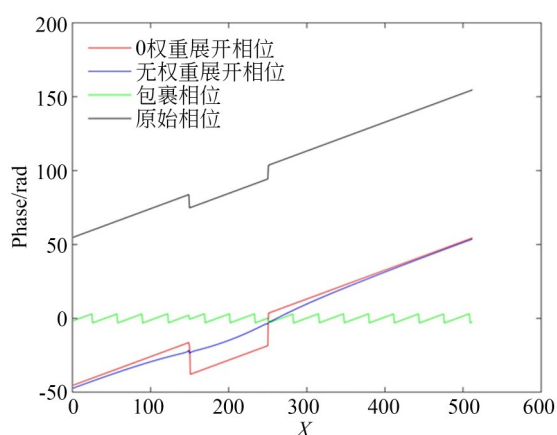


图1 不连续的一维相位展开示意图

Fig.1 Schematic diagram of discontinuous one-dimensional phase unwrapping

原始相位如图1中的黑线,是计算机模拟的一维不连续包裹相位, $X=150$ 和 $X=250$ 位置表示相位的不连续。一维的包裹相位如图1中绿线所示,可以看到这两个位置的相位值都会有突变。在未区分不连续位置的情况下,直接对相位进行无权重展开,如图1中蓝线所示的展开相位在不连续位置并没有发生跳变,在速率和相变方向两方面都是错误的(彩图见期刊电子版)。手动将不连续位置设置为0权重后对相位进行展开,如图1中红线所示的展开相位接近原始相位,说明相位的不连续对相位展开有很大影响。

3.2 方向相干性

使用傅里叶变换可以求得连续光学相位图案中每个像素点的方向角 θ ,方向角定义为:

$$\theta(i, j) = \frac{1}{2} \tan^{-1} \left(\frac{\sum_k \sum_l E(\omega_k, \omega_l) \sin(2\theta_{k,l})}{\sum_k \sum_l E(\omega_k, \omega_l) \cos(2\theta_{k,l})} \right), \quad (9)$$

其中: (i, j) 表示当前像素点, (k, l) 表示窗口坐标, $E(\omega_k, \omega_l)$ 表示邻域窗口的功率谱, $\theta_{k,l}$ 定义为 $\theta_{k,l} = \tan^{-1}(k, l)$,最后被估算的方向通过一个高低通滤波器进行平滑^[19]。

方向相干图是基于方向角计算得到,一个 $S \times S$ 尺寸大小的窗口是以当前像素点 (i, j) 为中心分别沿水平和垂直方向扩展所得, (k, l) 表示窗口内像素点的坐标,每个像素点 (i, j) 处的方向相干性可定义为:

$$C(i, j) = \frac{\sum_k \sum_l (\cos|\theta(i, j) - \theta(k, l)|)}{S \times S}, \quad (10)$$

其中: $\theta(i, j)$ 和 $\theta(k, l)$ 分别是中心点 (i, j) 和它的相邻点 (k, l) 平滑后的方向角。

方向相干性 $C(i, j)$ 的值在连续相位区域和不连续相位区域有较大的差别。连续区域的值比较高,因为中心点处的方向 $\theta(i, j)$ 与它的每个相邻点的方向值 $\theta(k, l)$ 是相似的,相反地,不连续处像素点的方向值是比较小的。相位图像的权重系数定义为:

$$w_{i,j} = \begin{cases} 1, & C(i, j) \geq T_c \\ 0, & C(i, j) < T_c \end{cases}. \quad (11)$$

3.3 基于后处理的权重计算

如上所述,估计的方向图用作指示包裹相位质量。为了获得权重掩码,有必要进一步分割WLS求解方法中的方向图用以展开相位。由于两个类别之间的差距较小,即连续区域和不连续区域的相位值较小,难以确定公式(5)所示的硬阈值。因此,提出了一种新的后处理解决方法,即在不使用硬阈值的情况下获得权重掩码,该方法由如下公式表示:

$$w_{i,j} = PF(\Phi_{i,j}), \quad (12)$$

式中, $PF(\cdot)$ 表示后处理函数。

获得权重掩码的后处理函数包括三个步骤:双边滤波、STDS和数值重新标记。事实上,相邻周期之间的方向跳跃严重影响了内在边界的分割(相位图中的不连续性),从而导致相位被错误地展开。为了抑制这种跳跃现象的出现,首先使用双边滤波器消除异常方向。然后,考虑到会存在有用边缘隐藏在纹理中的事实,采用具有图像平滑能力的STDS分别提取/去除双边滤波器输出的边缘/纹理。STDS的输出被明确标记为两个区域:值为0的连续区域和值为0.9的不连续区域。最后,通过重新标记两个区域得到权重掩码,即权重掩码为0对应连续区域,权重掩码为

1 对应不连续区域。所提出方法的整个方案如图 2 所示,后处理权重计算如图 3 所示。

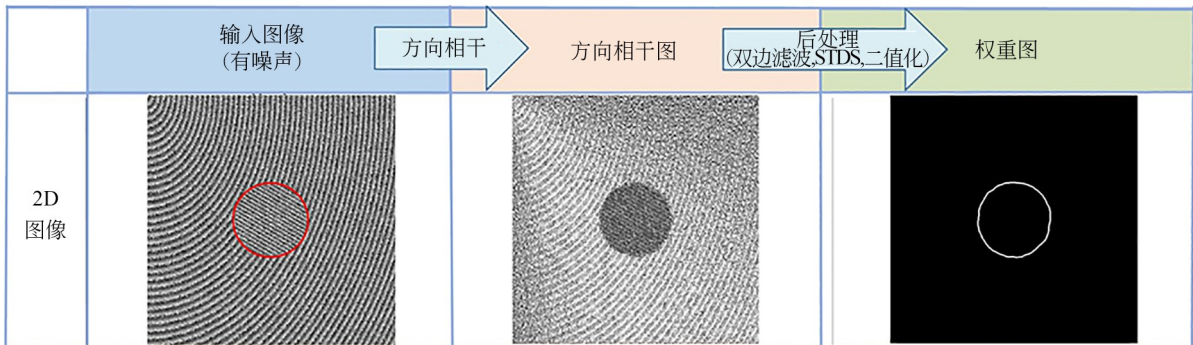


图2 所提出算法的流程图

Fig. 2 Flowchart of the proposed algorithm

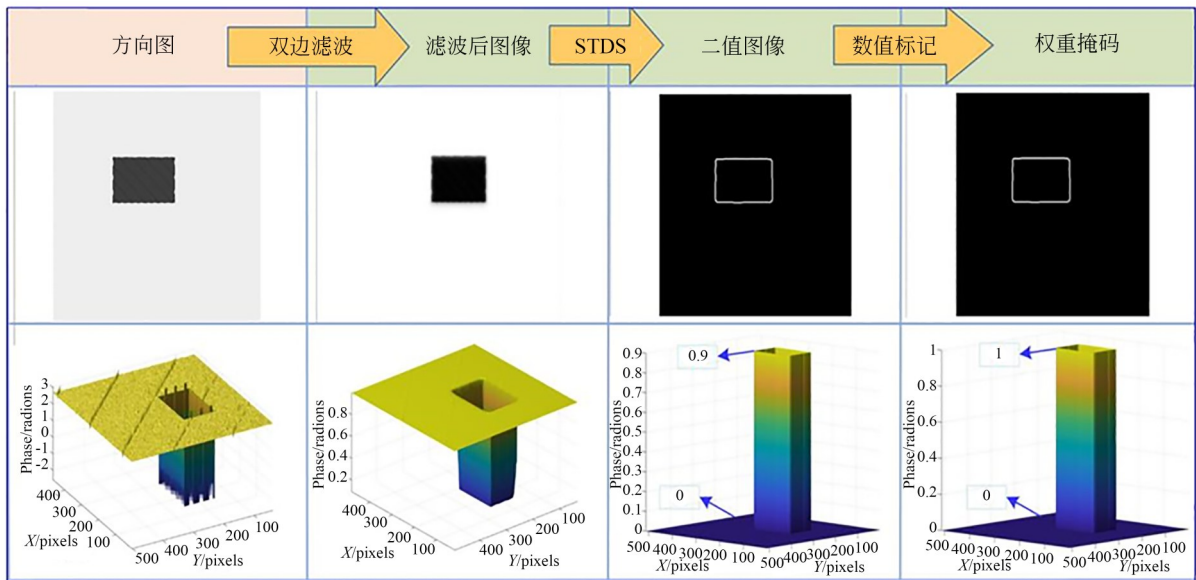


图3 后处理权重计算图

Fig. 3 Flowchart of post-processing weight calculation

4 实验结果与分析

为了定量评估所提出的不连续位置自适应分割的效果,与传统的手动阈值设置方法分别在仿真实验与实际试验中进行了比较。对比方法均在配备 Intel(R)Core(TM)i5-8250U 处理器、时钟频率为 1.6 GHz 和 8 GB RAM 的笔记本电脑上通过 MATLAB R2018b 编程实现。

4.1 仿真实验

不连续位置处的测量值和真值之间的分割平均误差 (Segmentation Mean Error, SME) 用于

定量验证权重掩码计算的准确性,表示为:

$$SME = \frac{\sum_{i=1}^n (P_i^* - P_i)}{n}, \quad (13)$$

其中: P_i^* 表示理想的不连续位置, P_i 表示实际的不连续位置,单位: pixel。

直线不连续图案 (512×512) 通过一条直线将线性变化方向不同的包裹相位图案分开为两部分,该直线表示不连续的位置,如图 4(a) 所示 (彩图见期刊电子版)。然后,添加平均值为 0, 方差值为 0.4 和 0.8 的加性随机噪声到该直线不连

续包裹相位图案上。本实验将选择方差为 0.4 和 0.8 的噪声验证所提出不连续位置自适应分割方法对噪声的鲁棒性,结果分别如图 4(d)和 4(f)所示。图 4(d)-4(f)所示的是图 4(a)-4(c)中不连续位置的自适应分割结果,白线表示识别的直线不连续位置,红线表示直线不连续位置的真值。为了定量地比较所提出方法的不连续分割性能,不同噪声程度(方差为 0,0.4 和 0.8)下分割结果的 SME 如表 1(第一行)所示。

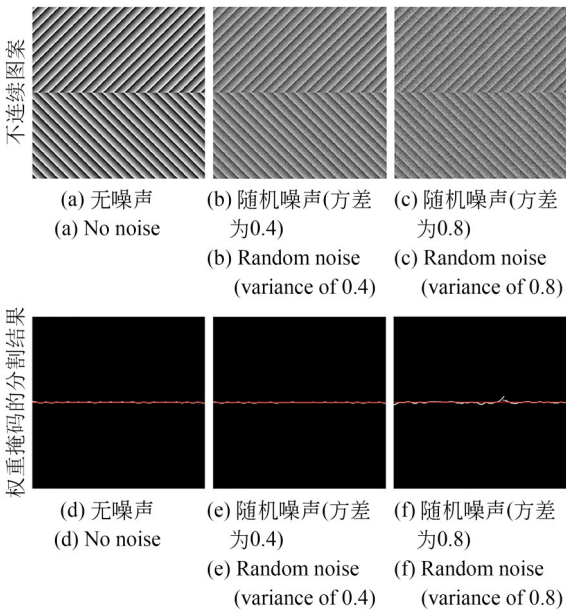


图 4 模拟直线不连续包裹相位图案识别结果对比
Fig.4 Comparison of the recognition results for phase patterns with simulated straight line discontinuities

矩形不连续条纹图案(512×512)通过封闭矩形边界将线性变化的包裹相位图案分开为内外两部分,该矩形边界表示不连续的位置,如图 5(a)所示(彩图见期刊电子版)。然后,添加平均值为 0、方差值为 0.4 和 0.8 的加性随机噪声到该矩形不连续包裹相位图案中。同样地,本实验仍然选择方差为 0.4 和 0.8 的噪声证明所提出算法对噪声的鲁棒性,分别如图 5(b)和 5(c)所示。图 5(d)-5(e)所示为图 5(a)-5(c)中不连续位置的分割结果,白线表示识别的矩形不连续位置,红线表示矩形不连续位置的真值。定量地,对于具有方差为 0、0.4 和 0.8 的随机噪声的不连续包裹相位图案。表 1 中的第二行所示为所提出方法识别矩形不连续位置时的 SME 结果,SME 分别为

0.116 5,0.872 5 和 3.000 2。通过对以上两种不连续类型的包裹相位图案在不同噪声水平下自适应识别不连续位置进行定量和定性结果的比较,本实验可以验证所提出的算法在存在一定噪声时仍然能够准确地识别包裹相位图案中的不连续位置,该实验结果说明所提出的不连续识别算法对噪声具有一定的鲁棒性。

表 1 直线与矩形不连续图案在不同噪声水平下的 SME 值

Tab.1 SME values of straight and rectangular discontinuous patterns at different noise levels (pixel)

Discontinuous type	SME		
	Variance		
	0	0.4	0.8
Line	0.036 2	0.513 3	1.678 3
Square	0.116 5	0.872 5	3.000 2

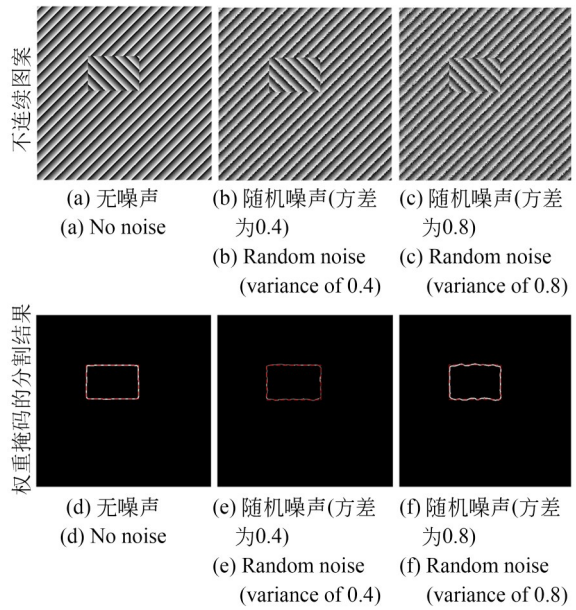


图 5 模拟矩形不连续包裹相位图案识别结果对比
Fig.5 Comparison of recognition results for simulated rectangular discontinuous wrapped phase patterns

4.2 实际测试

为了验证所提出方法在实际试验中对不连续位置自适应分割的效果,采用相位测量轮廓术方法得到的包裹相位图进行对比实验,相位测量轮廓术的硬件系统如图 6 所示。

基于空间相移的相位测量轮廓术用于在形貌测量实验中获取包裹相位图。该系统由 DLP LightCrafter 4500 和 JAI GO-5000M-USB 相机组成,用以验证所提出算法中不连续位置的识别对

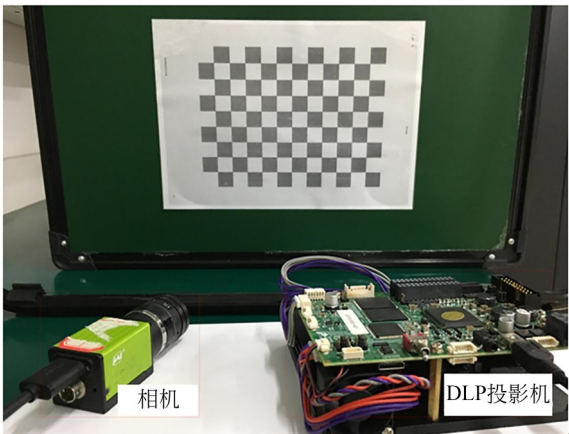


图 6 相位测量轮廓术硬件系统

Fig. 6 Hardware system of phase measurement profilometry

相位展开的影响性能。同样地,为了评估所提出方法的相位展开效果,本实验与手动设置阈值的方向相干法进行了比较。

对包含有长方体盒子和篮球的真实场景进行了测量,如图 7(a)所示。从图中可以看出,场

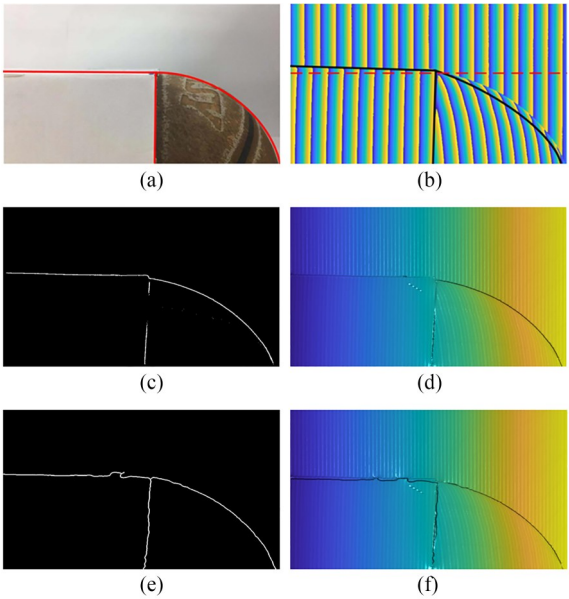


图 7 相位测量轮廓术的实验条纹图案的结果对比(a)真实场景;(b)包裹相位图像;(c)-(d)手动设置阈值的不连续分割结果及绝对相位的三维显示;(e)-(f)所提出方法的不连续分割结果及绝对相位的三维显示

Fig. 7 Comparison of experimental stripe patterns for phase measurement profilometry (a) Real scene; (b) Wrap phase images; (c)-(d) 3D display of discontinuous segmentation results and absolute phase manually set thresholds; (e)-(f) The discontinuity segmentation results and three-dimensional display of absolute phase of the proposed method.

景中包含有水平、垂直和弧形三种不连续位置。为了清楚地对比有噪声的包裹相位图像的分割效果,在图 7(b)中给出了包裹相位图像以及图中存在的不连续位置。手动阈值设置和自适应阈值设置所得到的不连续位置分割结果分别如图 7(c)和 7(e)所示。图 7(d)和图 7(f)所示为三维坐标下的绝对相位,不同颜色表示不同的相位深度。在图 7(b)中,可以看出盒子和篮球的连接区域已经很难分割。图 7(e)和图 7(f)所示为通过所提出的方法可以很好地对图案中的水平和垂直不连续性位置进行分割和展开。

对于存在不连续的包裹相位,所展开的绝对相位分布具有两个特点:(1)相位在不连续位置有跳跃;(2)跳变后的包裹相位与跳变前包裹相位的展开是独立的。图 8 所示为两种阈值选取方法展开的包裹相位中(图 7(b)中的第 255 行)的绝对相位。从图 8 可以看出,所提出的方法在标记点 A/B 处有明显的跳跃,这使得标记点 C 处的包裹相位能够独立于跳跃前的相位展开,表 2 给出了所需时间对比。

表 2 两种方法获取阈值的时间对比结果

Tab. 2 Time comparison of two methods for obtaining thresholds (s)

	Empiric value	Proposed method
Time	12	4. 234 8

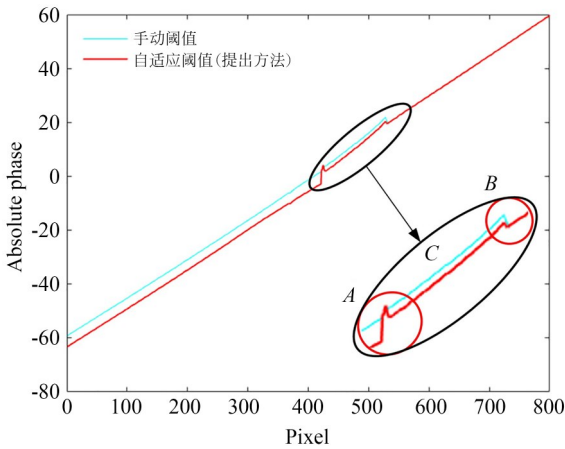


图 8 两种算法的一维(图 7(b)中的第 255 行)绝对相位分布结果图

Fig. 8 Absolute phase distribution results of the methods in one dimension (line 255 in Fig. 7(b))

5 算法分析

针对加权最小二乘相位展开法中需要通过多次试验获得适当阈值所具有的算法适应性较差的问题,提出了一种不连续位置自适应分割方法。仿真结果可以说明,所提出的方法在SME方面也具有最佳性能。此外,针对所提出方法的适应性给出了如下说明:

(1)相邻周期之间的方向跳跃严重影响内在边界的分割(相位图中的不连续位置),从而产生不正确的展开相位。为了抑制这种跳跃问题,在后处理中使用双边滤波器消除异常方向。

(2)考虑到有用的不连续位置隐藏在纹理中的事实,采用具有图像平滑能力的STDS方法提取/去除双边滤波器输出的边缘/纹理。实验结果表明,该方法对具有不同噪声方差的仿真图案具有鲁棒性。值得注意的是,如果噪声增加,不连续分割的准确性会降低。

(3)表2给出了两种阈值获取方法的相位展开消耗的时间对比,从表中可以发现,所提出的方法花费了4 s,可能影响实时三维重建的速度。改进C++中的算法和编程方式将在后续工作

中完成,以便该方法可以应用于实时的应用程序中。

6 结 论

由于加权最小二乘相位展开方法依赖于权重掩码的精度,针对加权最小二乘相位展开法中需要通过多次试验获得适当阈值所具有的算法适应性较差的问题,本文创新性地提出了一种不连续位置自适应分割方法。所提出的方法采用利用包裹相位图的方向相干性计算获得方向相干图。权重掩码是通过进一步对方向相干图执行后处理所获得,其中后处理包括双边滤波器、STDS和数值重新标记。仿真结果表明,所提出方法可以对含有较大噪声方差的包裹相位图案实现不连续位置的自适应分割。仿真实验证明该自适应方向相干法对噪声方差为0.4的包裹相位图中直线和矩形不连续位置的分割平均误差均小于1个像素。实际相位测量实验也证明所提出方法可以有效分割包裹相位图不连续位置,提高了加权最小二乘空间相位展开法在实际测量中的实用性和准确性。

参考文献:

- [1] 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.
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. (in Chinese)
- [2] 史耀群, 邓林嘉, 王朝旭, 等. 一种基于结构光条纹投影的微小物体测量系统[J]. 应用光学, 2019, 40(6): 1120.
SHI Y Q, DENG L J, WANG Z X, *et al.* Micro-objects measurement system based on structured light fringe projection [J]. *Journal of Applied Optics*, 2019, 40(6): 1120. (in Chinese)
- [3] GUO H Y, ZHOU H W, BANERJEE P P. Single-shot digital phase-shifting Moiré patterns for 3D topography[J]. *Applied Optics*, 2021, 60(4): A84-A92.
- [4] GHIGLIA D C, PRITT M D. *Two-Dimensional Phase Unwrapping: Theory, Algorithms, and Software*[M]. A Wiley-Interscience Publication, 1998.
- [5] WANG H X, MA J M, YANG H L, *et al.* Development of three-dimensional pavement texture measurement technique using surface structured light projection[J]. *Measurement*, 2021, 185: 110003.
- [6] HU Y, CHEN Q, FENG S, *et al.* Microscopic fringe projection profilometry: A review[J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2020, 135: 106192.
- [7] GOLDSTEIN R M, ZEBKER H A, WERNER C L. Satellite radar interferometry: two-dimensional phase unwrapping [J]. *Radio Science*, 1988, 23(4): 713-720.
- [8] SU X Y, CHEN W J. Reliability-guided phase unwrapping algorithm: a review[J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2004, 42(3): 245-261.
- [9] ZHANG S, LI X L, YAU S T. Multilevel quality-guided phase unwrapping algorithm for real-time three-dimensional shape reconstruction [J]. *Applied Optics*, 2007, 46(1): 50-57.
- [10] LU Y G, WANG X Z, ZHANG X P. Weighted least-squares phase unwrapping algorithm based on

- derivative variance correlation map [J]. *Optik*, 2007, 118(2): 62-66.
- [11] QIAN K M, GAO W J, WANG H X. Windowed Fourier-filtered and quality-guided phase-unwrapping algorithm [J]. *Applied Optics*, 2008, 47(29): 5420-5428.
- [12] 邓吉, 李健, 封皓, 等. 不连续相位跳变点的三维深度分割[J]. *光学精密工程*, 2019, 27(11): 2459-2466.
- DENG J, LI J, FENG H, *et al.* Three-dimensional depth segmentation technique utilizing discontinuities of wrapped phase sequence [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2019, 27(11): 2459-2466. (in Chinese)
- [13] 李梦霞, 曹博, 卢佳玮, 等. 数学形态学区域分割的快速相位解包裹算法[J]. *光学精密工程*, 2021, 29(11): 2724-2733.
- LI M X, CAO B, LU J W, *et al.* Fast phase unwrapping algorithm based on region segmenting with mathematical morphology [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2021, 29(11): 2724-2733. (in Chinese)
- [14] CUI H H. Reliability-guided phase-unwrapping algorithm for the measurement of discontinuous three-dimensional objects [J]. *Optical Engineering*, 2011, 50(6): 063602.
- [15] ZHAO M, WANG H X, KEMAO Q. Snake-assisted quality-guided phase unwrapping for discontinuous phase fields [J]. *Applied Optics*, 2015, 54(24): 7462-7470.
- [16] WANG H X, QIAN K M. Local orientation coherence based segmentation and boundary-aware diffusion for discontinuous fringe patterns [J]. *Optics Express*, 2016, 24(14): 15609.
- [17] WANG H X, QIAN K M. Boundary-aware single fringe pattern demodulation [J]. *Optics Express*, 2017, 25(26): 32669.
- [18] YAN L P, ZHANG H Y, ZHANG R, *et al.* A robust phase unwrapping algorithm based on reliability mask and weighted minimum least-squares method [J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2019, 112: 39-45.
- [19] LI B Y, TANG C, ZHOU Q L, *et al.* Weighted least-squares phase-unwrapping algorithm based on the orientation coherence for discontinuous optical phase patterns [J]. *Applied Optics*, 2019, 58(2): 219-226.
- [20] GUO X J, LI S Y, LI L, *et al.* Structure-texture decomposition via joint structure discovery and texture smoothing [C]. 2018 *IEEE International Conference on Multimedia and Expo (ICME)*. San Diego, CA, USA. IEEE, 2018: 1-6.

作者简介:



邓高旭(1991—),男,山西左权人,工学博士,讲师,2022年于武汉科技大学获得博士学位,主要从事机器视觉及结构光三维精密测量的研究。E-mail: denggaoxu@tyust.edu.cn

通讯作者:



马立东(1980—),男,河北迁安人,工学博士,教授,博士生导师,于2010年在燕山大学获得博士学位,从事智能机器人、先进精密检测技术、智能化弯曲与矫直理论、工艺与装备等方面的研究工作。E-mail: mald@tyust.edu.cn