

面向物体表面测量的四步相移光解码技术研究

谢捷如 崔海华

(南京航空航天大学自动化学院, 江苏 南京 210016)

摘要 精确高效的相位解码在非接触光学测量中有着重要的作用, 在总结传统算法的基础上, 提出一种新的相移光解码算法。该算法是以四步相移为基础, 对初始的包裹相位图使用残差检测理论, 检测、提取、标志出残差点, 然后使用一种新的相位质量图指导剩余残差点的检测, 为了使质量图中残差点的检测达到最优, 对质量图进行低通滤波、锐化残差编码点, 尽量使残差点能完全检测出来, 并进行残差平衡处理, 最终选取一个种子点使用洪水算法实现整张编码图的解码。实验结果显示该相移光解码算法能自动避开不连续区域, 得到较高质量的编码结果。

关键词 三维测量; 光解码; 相移算法; 相位展开

中图分类号 TH741 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS20092902.0370

Study on Four-Step Phase-Shifting Decoding Algorithm for Three-Dimensional Profilometry

Xie Jieru Cui Haihua

(College of Automation Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing, Jiangsu 210016, China)

Abstract Accurate and efficient phase decoding algorithms play an important role in noncontact optical phase-measurement. This paper develops a new phase-shifting decoding algorithm based on analysis of the traditional method. At first, four-step phase-shifting method is used to get the unwrapping phase, The residues theory is used to check the residues. Then a new reliability ordering map is used to guide to check rest of the residues. Low-pass filter algorithm is used to get the optimum check results. At last we place the branch cuts to balance all the residuals and decode the whold image by flood algorithm. Experimentations show that the proposed optical decoding algorithm is effective and robust.

Key words three-dimensional measurement; optical decode; phase-shifting; phase unwrapping

1 引言

光学式三维物体轮廓测量技术通过分析图像, 得到被测物体表面形状的三维信息, 在 CAD/CAM、机器人视觉、质量控制、逆向工程以及医疗诊断等领域有着广阔的应用前景^[1,2]。二维相位解码技术是非接触光学测量技术中的核心所在, 因为经过相位解码得到的二维相位值隐含所要获取的物体表面的高度信息。

二维编码图像首先经过反正切函数处理得到主值在 $[-\pi, +\pi]$ 的未解码相位, 对获得的主值相位通过加减周期 2π 的整数倍来恢复全场完整相位值

的方法, 就称为相位解码或相位解包裹^[3]。对所有的相位解码算法大致可分为路径相关和路径不相关两种。路径不相关算法实现的思想是首先建立表征相位不连续的一个目标函数, 通过最小化该目标函数最终实现所有相位的解码, 具有代表性的是最小二乘法^[4], 基于图像形态学的算法^[5], 这种方法有它们的局限性只能处理某些问题; 路径相关算法是基于一些已知相关信息设定路径, 沿着路径达到积分完成, 主要包括枝切截断算法^[6], 质量导向图算法^[7,8]等, 这些算法的可靠性主要依靠相位质量图的精确性, 对质量图的依赖性过强。本文提出了一

收稿日期: 2008-08-30; **收到修改稿日期**: 2008-10-11

基金项目: 江苏省高技术研究计划项目(DG2006035)和江苏省科技攻关(BE2005014)资助课题。

作者简介: 谢捷如(1968—), 女, 博士研究生, 讲师, 主要从事计量测试技术及机器视觉等方面的研究。

种相位解码算法,该算法综合枝切截断算法和相位质量图导向的优点,使用残差理论及相位质量图指导放置枝切截断线,为了使质量图中残差点的检测达到最优,对质量图进行了低通滤波、锐化残差编码点处理,尽量使残差点能完全检测出来,最后对整张包裹相位图使用洪水算法^[9]完成正确相位解码。实验结果显示这种算法具有较好的噪声免疫性,能处理轮廓特征复杂的相位解码问题,是一种鲁棒性高的相位解码算法。

2 基于相移编码的三维测量原理

图 1 是基于编码的三维测量结构图,相机 CCD 相面内像素点为 (u_c, v_c) ,该像素点对应的相位编码为 $\varphi_a(u_c, v_c)$,该相位编码值在投影仪内为一条编码线,投影仪内该相位编码线可转换为像素 u 方向坐标: $u_p = f[\varphi_a(u_c, v_c)]$,在投影仪、相机和被测物体之间建立了一个三角关系,从而能获取被测物体的表面数据^[3]。

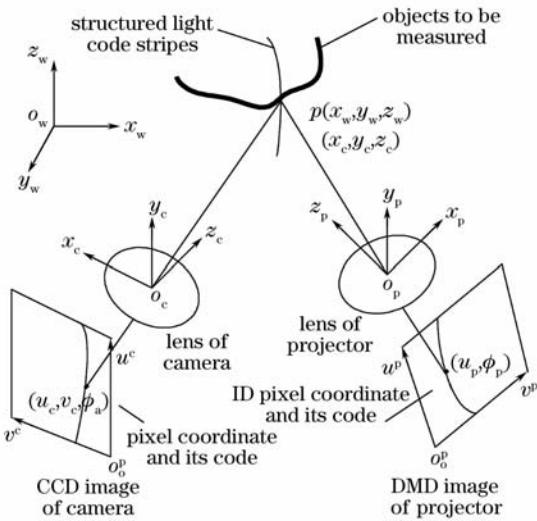


图 1 三维测量重建系统模型结构图

Fig. 1 System structure of three-dimensional coordinate measurement model. DMD: Digital micromirror device

基于编码的物体表面三维数据获得可由以下隐式方程组获得

$$\begin{cases} f_1(x_w, y_w, z_w, u_c) = 0, \\ f_2(x_w, y_w, z_w, v_c) = 0, \\ f_3(x_w, y_w, z_w, u_p) = 0. \end{cases} \quad (1)$$

3 相位解码技术研究及算法对比

3.1 传统的路径相关解码技术

枝切截断法以 Goldstein 的算法^[4]最具有代表性。相位解码的过程在数学上可以看做是一个积分

的过程,如果没有残差的存在那么相位能沿着任何路径进行展开,即线性积分结果不依赖于路径的选择。对于离散的图像,Goldstein 和 Huntley 根据格林公式提出了一种离散算法,计算相位图中逆时针的最小封闭路径值,即包括临近 4 个像素的正方形区域,不连续的像素点可用以下方法进行检测出来,如下式:

$$Q(i, j) = [\varphi(i+1, j+1) - \varphi(i, j+1)] - [\varphi(i+1, j) - \varphi(i, j)] - [\varphi(i+1, j+1) - \varphi(i+1, j)] - [\varphi(i, j+1) - \varphi(i, j)], \quad (2)$$

(2)式中 i, j 表示像素坐标, $\varphi(i, j)$ 表示该像素点的未解缠相位。 $Q(i, j)$ 值为零表示非残差点,反之, $Q(i, j)$ 值的正负性表示残差点的正负极性。这种方法简称为“四点环绕检查是否为零”的残差理论。根据 Goldstein 的相位残差检测理论^[10]检测残差并指导放置截断相位线,当所有的残差被平衡完,也就保证了以任何环形路径积分结果均为零,那么相位的解码沿任何不穿过截断线的路径进行展开,结果不变。该算法对枝切截断线的选取是非常快速和有效的,但是该方法中使用的残差理论对不连续相位的存在的检测只是充分非必要条件^[11],因此该算法不能检测出所有的不连续点,剩余的残差点将会导致相位误差繁衍播。

基于质量图导向的算法以 Flynn^[12]算法较为典型,该算法吸收枝切截断算法和基于质量图导向的解码方法的优点,称之为掩模阻断(mask cut)算法。利用质量图设置分支,从残差点周围质量较低的点开始生长分支,使分支尽可能地处于低质量区域,在平衡所有残差点后,在分支以外的区域按任意路径进行相位展开。该算法由于使用质量图信息合理地把枝切阻断线限制在质量较低的区域,能较好地避免积分解包裹路径通过低质量区域^[10]。但是该方法使用过程中抛弃了残差理论的使用,完全依赖于相位质量的好坏进行相位展开,并且在初始相位低质量像素判别时简单使用了自定初始值,不能保证不连续的残差点都被包容在内,对该阈值的动态调整是机械的固定值累加,这种方法对经验度要求很高,检测出来的参差点的好坏具有很大的主观性。

3.2 改进的相移解码技术

本文综合 3.1 节算法的优点提出一种新的相位解码方法。利用残差理论尽可能多地检测出所有的残差点,对残差点进行位标志,然后选择可靠性比较高的相位梯度质量图和二阶差分误差图作为放置枝切截断线

的导向图,对该质量导向图低通滤波锐化残差点,对获得的所有残差点分别标志,融合所有的残差并放置枝切截断线,依靠残差图指导实现相位解码。

3.2.1 质量导向图的生成

相位质量图是描述包裹相位图每个像素数据质

量好坏的二维数据,不连续点,残差点和低信噪比等不可靠数据区域的质量值比较低。相位导数偏差图,被认为是一种较能反映相位质量的质量图^[10]。相位图中 (i,j) 处的相位导数偏差定义为

$$Q_1(i,j) = \left[\sqrt{\sum_{i=m-k/2}^{m+k/2} \sum_{j=n-k/2}^{n+k/2} (\Delta_{i,j}^x - \bar{\Delta}_{m,n}^x)^2} + \sqrt{\sum_{i=m-k/2}^{m+k/2} \sum_{j=n-k/2}^{n+k/2} (\Delta_{i,j}^y - \bar{\Delta}_{m,n}^y)^2} \right] / k^2, \quad (3)$$

式中 k 为进行卷积的窗口的长度, m,n 为像素中心坐标, $\Delta_{i,j}^x, \Delta_{i,j}^y$ 分别为在 x,y 方向的包裹相位偏导数, $\bar{\Delta}_{m,n}^x, \bar{\Delta}_{m,n}^y$ 分别是 $k \times k$ 窗口内包裹相位偏导数的均值。

二阶相位差分对于区分间断线和相位不连续有良好的表现^[13],二阶相位差分值不仅能有效地标志出逻辑上不连续的点而且能标志出由于欠采样、噪音等引起的无效像素点。其计算公式算如下:

$$Q_2(i,j) = [H^2(i,j) + V^2(i,j) + D_1^2(i,j) + D_2^2(i,j)]^{1/2}, \quad (4)$$

式中

$$\begin{aligned} H(i,j) &= w[\varphi(i-1,j) - \varphi(i,j)] - w[\varphi(i+1,j) - \varphi(i,j)], \\ V(i,j) &= w[\varphi(i,j-1) - \varphi(i,j)] - w[\varphi(i,j) - \varphi(i,j+1)], \\ D_1(i,j) &= w[\varphi(i-1,j-1) - \varphi(i,j)] - w[\varphi(i,j) - \varphi(i+1,j+1)], \\ D_2(i,j) &= w[\varphi(i-1,j+1) - \varphi(i,j)] - w[\varphi(i,j) - \varphi(i+1,j-1)]. \end{aligned}$$

以实例表示如图2,以中心0点在其周围八邻域方向上求其二阶差分值,以正右方为例:

$$Q' = 2\varphi^*(1) - \varphi^*(0) - \varphi^*(9), \quad (5)$$

式中 φ^* 表示简单的移除临近像素点之间的 2π 相位跳动局部相位展开操作,具体为

$$\begin{aligned} \varphi^*(0) &= \varphi(0), \\ \varphi^*(1) &= \varphi^*(0) + [\varphi(1) - \varphi(0)], \\ \varphi^*(9) &= \varphi^*(1) + [\varphi(9) - \varphi(1)], \end{aligned}$$

$\varphi(i)$ 表示该像素点的包裹相位值, $[\]$ 表示对 2π 取模。

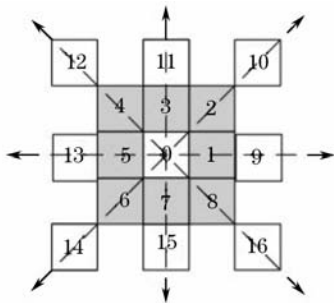


图2 二阶相位差分图

Fig. 2 Second order phase difference map

本文的相位质量图具体实现由下式定义:

$$Q(x,y) = Q_1(i,j) \times Q_2(i,j), \quad (6)$$

新的相位质量图融合了相位质量导数图和二阶相位差分的优点,更准确地反映出相位的质量,低质量的数据在质量图中被限制在一个局部的区域内,

大部分不连续、噪音点、亚采样点等都包含在一定的分割阈值之内,质量数值以灰度来表示如图3,白色为质量较差区域。



图3 相位质量图。(a)相移编码图,(b)质量图未锐化,(c)锐化残差质量图

Fig. 3 Phase quality guided map. (a) Phase-shifting code picture, (b) quality guided map, (c) quality map after edge detection

图3(a)是四幅相移编码条纹中的一幅,头像右下方编码条纹质量较差,对应于质量图3(b)中,颜色较浅的是质量较差的像素点,该质量图清晰地表示出来编码图中的编码信息的好坏,图3(c)是对质量图低通滤波,锐化质量较差的结果,通过处理,把残差点清晰地提取出来用于枝切线的连接放置。

3.2.2 解码算法过程

本文算法综合枝切截断算法和相位质量图导向的优点。混合使用残差理论及相位质量图导向在图中进行放置枝切截断线,对整张包裹相位图使用洪水算法^[9]进行相位解码,解码过程中避开枝切截断

相位区域,完成相位解码,可简要分为以下四步:

- 1) 根据残差原理检测出残差点并进行位标志。
- 2) 生成用于指导放置枝切线相位质量图。
- 3) 对相位质量图进行低通滤波,锐化残差像素点并进行位标志。
- 4) 融合以上残差点并放置枝切截断线,使用洪水算法绕开截断线实现相位完全解码。

4 试验结果及对比验证

为了验证本文的相位解码算法,搭建系统对石膏头像模型测量并进行相位解码。图 4(a)是未解码相位包裹图,相位被限制在 $[-\pi, +\pi]$ 主值范围内,经过本文算法的相位解码处理,获得相位解码图 4(b)。结合质量图 3 看出,相位解码均匀,没有出现错误的码值跳动或码值断裂、空洞等现象。图 4(c)和图 4(d)分别是使用 Goldstein 枝切算法和 Flynn 的掩模算法的解码结果。从图 4(c)很显然可以看出,头像鼻梁左侧,下巴及头左上部残差区域没有检测出,这是由于不能完全检测到所有残差点,导致相位错误解码穿过该区域引起误差繁殖出现错误码值;图 4(d)是掩模算法的解码结果,相位解码图右下方出现了很多岛屿状的空洞区域,那是由于过分依赖相位质量图,没有正确设定掩模,导致枝切线形成了环形封闭区域导致相位解码出现岛屿状不能解开的区域,导致相位误差繁殖传播,出现了相位的不连续繁殖的情况。

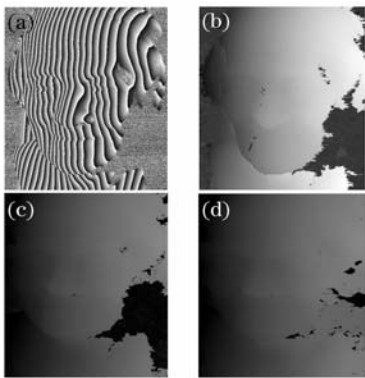


图 4 相位解码图。(a)包裹相位编码图,(b)本文解码算法结果,(c)Goldstein 算法结果,(d)Flynn 算法结果

Fig. 4 Phase decoding map. (a) Wrap phase code map, (b) Our decoding algorithm result, (c) Goldstein algorithm result, (d) Flynn algorithm result

5 结 论

本文提出了一种用于三维测量的相位解码算法,该算法基于枝切截断进行相位解码,它融合了枝切截断相位解码算法和相位质量图的优点,根据相位质量图指导放置枝切线,弥补了残差理论的自身性缺陷,保证了相位解码的正确性,对相位质量进行低通滤波,锐化残差,最大限度地检测到所有的残差点同时又尽量保证检测尽量少的残差像素点。通过对实际相位图的解码实验,表明该算法能自动绕开噪声区域,完成整个相位的解码,有效地解决了由于噪声,低调制度等因素引起的相位间断点以及不连续分布对相位解码的影响,取得了较好的相位解码结果。

参 考 文 献

- 1 O. Faugeras. Three-Dimensional Computer Vision. A Geometric Viewpoint[M]. MIT Press, Cambridge MA, 1993
- 2 Wu Di, Lü Naiguang, Ouyang Jing. A structured light three-dimensional measurement method based on unconstrained system configuration[J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(3): 482~486
吴迪,吕乃光,欧阳京. 基于无约束系统的结构光三维测量方法[J]. *光学学报*, 2008, **28**(3): 482~486
- 3 V. V. Volkov, Y. Zhu. Deterministic phase unwrapping in the presence of noise[J]. *Opt. Lett.*, 2003, **28**(22): 2156~2158
- 4 J.-J. Chyou, S.-J. Chen, Y.-K. Chen. Two-dimensional phase unwrapping with a multichannel least-mean-square algorithm[J]. *Appl. Opt.*, 2004, **43**: 5655~5661
- 5 Soille P. Morphological phase unwrapping[J]. *Opt. Laser Eng.*, 2000, **32**(4): 339~352
- 6 R. M. Goldstein, H. A. Zebker, C. L. Werner. Two-dimensional phase unwrapping[J]. *Radio Sci.*, 1988, **23**: 713~720
- 7 X. Su, W. Chen. Reliability-guided phase unwrapping algorithm: a review[J]. *Opt. Lasers Eng.*, 2004, **42**(3): 245~261
- 8 Zhu Yongjian, Luan Zhu, Sun Jianfeng *et al.*. Quality weight based discrete cosine transform phase unwrapping algorithm in optical interferogram processing[J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, **27**(5): 848~852
朱勇建,栾竹,孙建锋等. 光学干涉图像处理中基于质量权值的离散余弦变换解包裹相位[J]. *光学学报*, 2007, **27**(5): 848~852
- 9 J. M. Huntley. Noise-immune phase unwrapping algorithm[J]. *Appl. Opt.*, 1989, **28**(15): 3268~3270
- 10 D. C. Ghiglia, M. D. Pritt. Two-Dimensional Phase Unwrapping: Theory, Algorithm, and Software Algorithm[M]. New York: John Wiley and Sons, Inc., 1998
- 11 Xiao Feng, Wu Jicang, Zhang Lei. A new method about placement of the branch cut in two-dimensional phase unwrapping [C]. *APSAR' 2007*. 755~759
- 12 T. J. Flynn. Consistent 2-D phase unwrapping guided by a quality map[C]. *Proc. 1996 International Geoscience and Remote Sensing Symposium*, Lincoln NE, 1996. 2057~2059
- 13 Quiroga J A, Gonzalez-Cano A, Bernabeu E. Phase-unwrapping algorithm based on an adaptive criterion[J]. *Appl. Opt.*, 1995, **34**(14): 2560~2563