

文章编号 1004-924X(2004)04-0438-05

基于调制度分割的物体轮廓 有效测量区域自动识别方法

何海涛, 陶 涛, 陈明仪, 郭红卫
(上海大学 精密机械工程系, 上海 200072)

摘要: 提出了采用调制度阈值分割技术进行物体轮廓有效测量区域自动识别的一种新方法, 克服了投射条纹三维测量技术中由于阴影、条纹断裂、局部镜面反射、暗背景、采样不足以及外来的噪声等因素, 使得被测物体表面存在无效测量区域(相位数据不可靠区域)的问题。采用了时域相位去包裹技术, 保证了无效区域的相位数据不会影响到有效测量区域的相位数据。与有效测量区域相比, 无效区域的调制度明显较低, 对调制度直方图进行分析, 借鉴图像分割的思想, 采用了迭代算法自动求解最佳阈值, 辨识物体轮廓测量的有效测量区域和无效测量区域, 实现了单视角测量的自动化过程。车灯反射体测量实验证明了这种方法的优越性和可靠性。

关键词: 三维测量; 相位去包裹; 调制度; 自动分割

中图分类号: TG88 文献标识码: A

Approach of automatically identifying valid measure area by using modulation segmentation for 3D profilometry

HE Hai tao, TAO Tao, CHEN Ming-yi, GUO Hong wei

(Precision Mechanical Engineering Department, Shanghai University, Shanghai 200072, China)

Abstract: An approach to identify the valid measure area automatically by using threshold segmentation with respect to the modulation for 3D profilometry was provided. The existing fringe projection technique cannot effectively deal with the invalid measure area due to local shadows, irregular reflectivity, fringe discontinuities, unlighted background, under-sampling, etc. The phase data from the invalid areas will have no effect on the data from the valid areas by using temporal phase unwrapping. The modulation from the invalid area is significantly lower than that from the valid measure area. Deriving from the image segmentation concept, the method can calculate iteratively the optimal threshold of the segmentation for automatically identifying the valid measure area by analyzing the modulation histogram. Thus it makes a single view measurement procedure automatic. The resulting phase of a 3D shape of an automobile headlamp reflector is also presented to verify the advantages and the reliability of the method.

Key words: 3D shape measurement; phase unwrapping; modulation; automatic segmentation

收稿日期: 2004-02-15; 修订日期: 2004-07-16.

基金项目: 上海市“光科技专项”资助项目(No. 011461059)

1 引言

光学三维传感技术由于其具有非接触、精度高及快速等优点在许多领域得到广泛应用^[1-3]。随着计算机以及图像处理技术的迅速发展,以投射条纹为代表的光学三维测量方法得到很大发展,在这一技术中,自动条纹分析技术是最关键的。凡采用相移(Phase shifting)或傅里叶变换方法进行分析的有个共同的问题—由于使用了反正切函数而使相位包裹在 $(-\pi, \pi]$ 之间,需要进行相位去包裹处理(Phase Unwrapping)。

在条纹投射测量方法中,由于三角测量法固有的特点,遮挡造成的阴影是不可避免的;当被测物体具有台阶或者不连通区域,依赖路径的去包裹技术显得无能为力;条纹图像本身具有的噪声以及背景、外来误差等因素,使得被测物体表面不可避免地存在数据不可靠区域即无效测量区域。与有效测量区相比,无效测量区的调制度明显较低。已有的诸多算法^[4-12]都面临这个同样的问题,使得去包裹计算存在不可靠区域,因而不能普遍适用于各种测量表面。为此,文献[13]提出将调制度分析用于相位去包裹计算,文献[14]提出基于调制度分析的加权最小二乘位相展开方法。这些方法的共同特点是基于调制度直方图的分析—设定一阈值,将有效测量区域从含有背景、阴影、表面不连续等区域的条纹图中分辨出来,绕过这些无效区域完成相位去包裹计算。由于被测对象千差万别,表面材质多样,光照或反射不均匀等各种因素,调制度直方图不一定出现明显的峰和谷,总存在一些“锯齿”结构,噪声的干扰使得谷底的位置难以判断,阈值设定的准确性很差,并且这一做法显然降低了条纹分析软件的自动化程度。

针对上述问题,本文借鉴图像分割的原理^[15],对调制度分布图进行分析,提出一种基于调制度自动分割的物体轮廓有效测量区域自动识别方法。实验结果表明,该方法能够实现阈值的最佳选取,自动识别物体轮廓有效测量区域,无需先验知识或者人工干预。

2 相位去包裹

当投射正弦条纹到被测物体上,对于 CCD 采

集到的条纹图像像素点 (i, j) 的灰度可以表示为:

$$I(i, j) = a(i, j) + b(i, j) \cos[\varphi(i, j) + \delta(t)] \quad (1)$$

$a(i, j)$ —背景分布, $b(i, j)$ —调制度分布, $\varphi(i, j)$ —相位分布, $\delta(t)$ —相移量。对于 N 次相移法,第 n 幅图像的灰度可以表示为:

$$I_n(i, j) = a(i, j) + b(i, j) \cos[\varphi(i, j) + \frac{2n\pi}{N}J], \quad n = 0, 1, 2 \dots N-1, \quad (2)$$

那么相位值为:

$$\varphi(i, j) = -\tan^{-1} \left[\frac{\sum_{n=0}^{N-1} I_n \sin(2n\pi/N)}{\sum_{n=0}^{N-1} I_n \cos(2n\pi/N)} \right], \quad (3)$$

最后得到的是在 $(-\pi, \pi]$ 之间的包裹相位,因此必须采用相位去包裹技术处理才能得到连续的相位数据。由于包裹相位分布图中存在相位不可靠的无效测量区域,采纳空域去包裹算法在计算过程中会发生误差传播,即一点的误差会随去包裹路径传播到后继各点,传统的相位去包裹算法难以解决这一问题。

针对以上问题,文献[16-19]提出了时域相位去包裹方法,认为每一像素点的相位是时间的函数,解包裹是沿着时间轴进行;由于各点计算过程无关,从而保证无效区域的数据不会影响到有效测量区域的数据,这为相位分布图中自动去除无效区的测量数据打下基础。

采用计算机生成变频条纹图像,并用连接在计算机上的 DLP 投影机投射待测物体表面,通过程序可方便地改变条纹的频率和方向,而无须借助机械运动部件来达到此目的。

3 调制度自动分割技术

投射条纹三维测量中,对调制度进行分析,辨识有效测量区域和无效测量区域是物体轮廓测量的重要步骤。

对于每一次条纹投射满足 N 步相移法,那么调制度函数 $b(i, j)$ 为^[13]:

$$b(i, j) = \frac{2}{N} \left\{ \left[\sum_{n=0}^{N-1} I_n(i, j) \sin(2n\pi/N) \right]^2 + \left[\sum_{n=0}^{N-1} I_n(i, j) \cos(2n\pi/N) \right]^2 \right\}^{1/2}, \quad (4)$$

其中 (i, j) 对应图像坐标的像素。将调制度分为级数 $L(0, 1, \dots, L-1)$, 直方图是相位各等级按像素的一个统计度量。

对调制度直方图进行分析, 设定阈值, 可以把遮挡生成的阴影、具有台阶或表面不连续、背景、局部镜面区域、光照饱和点等相位不可靠区域分辨出来。通常情况下调制度阈值的选取由人工干预完成, 或者通过搜索调制度直方图的极小值所在位置来确定, 由于存在各种干扰因素, 很难保证准确地选取阈值。

3.1 调制度分割的原理

设原始调制度函数分布为 $b(i, j)$, 以一定准则在 $b(i, j)$ 中找到一个等级 T 作为阈值, 据此使得相位分布图分为可靠和不可靠两个部分:

$$R(i, j) = \begin{cases} 1, & b(i, j) > T \\ 0, & b(i, j) \leq T \end{cases}, \quad (5)$$

$R(i, j) = 1$ 表示最后获得的相位是可靠的, 0 是不可靠的。这里阈值选取是关键, 假如阈值选取过小, 被包罗的测量区域过大, 相位不可靠的数据将被计入; 阈值选取过大, 被包罗的区域过小, 相位数据虽然更可靠, 但去除的无效区数据过多, 过多的目标点被误认为无效区域, 使得测量的效率降低, 不利于曲面重构。因此, 应该选取一个最优的阈值。本文参考图像分割中的算法^[15, 20], 采用迭代法自动求解最佳阈值。

3.2 调制度分割阈值的选取

取调制度等级范围的中值作为初始阈值 T^0 (共有 L 个灰度), 然后可按式(6)迭代:

$$T^{i+1} = \frac{1}{2} \left\{ \frac{\sum_{k=0}^{T_i} h_k k}{\sum_{k=0}^{T_i} h_k} + \frac{\sum_{k=T_{i+1}}^{L-1} h_k k}{\sum_{k=T_{i+1}}^{L-1} h_k} \right\}, \quad (6)$$

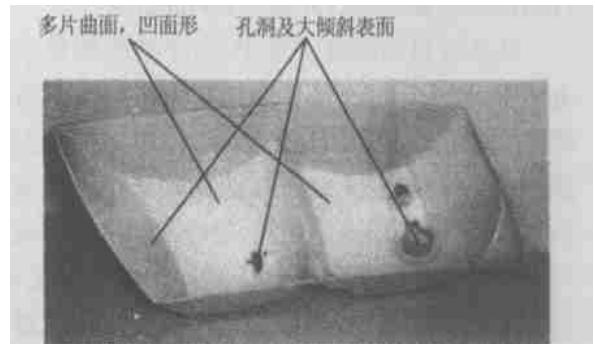
其中 i 是迭代次数, h_k 是等级为 k 值的像素个数, 迭代一直到 $T^{i+1} = T^i$ 结束, 取结束时的 T^i 为分割阈值。

从直方图直观来看, 该方法得到的阈值处在与两类区域等级的重心成反比的位置, 所以从路径规划的角度来看是一种最优阈值^[15]。

设调制度噪声互不相关, 且具有零均值, 标准差为 ε , 可认为噪声幅度分布以 99.7% 高概率集中在 $[-3\varepsilon, +3\varepsilon]$ 范围内^[20]。在等级范围 $[T, T+3\varepsilon]$ 的无效区域有可能错分为有效区域, 当标准差较小时, 可取最佳阈值等级 $T = T + 1$ 。

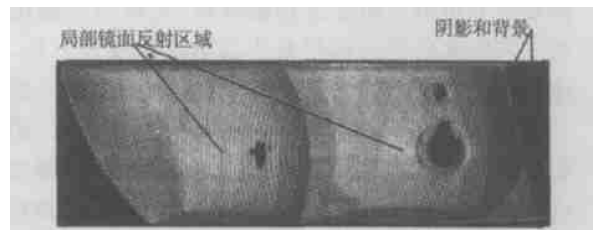
4 实验验证

对一轿车前车灯反射体进行测量, 其是典型的复杂表面, 如图 1 所示, (a) 为实物图片, (b) 为单个视角的受物面调制的条纹图。其复杂性表现在: (1) 由多曲面片构成; (2) 以凹面形状为主; (3) 含有孔洞及大倾斜表面; (4) 含有局部镜面反射区域; 测量时还存在阴影和背景(图中 5), 这些被测区域的相位数据是不可靠的, 即为无效区域。为获得全部测量数据, 可采用多视角测量, 无效区域



(a) 实物照片

(a) Photograph



(b) 调制后的条纹灰度图

(b) The modulated fringe gray pattern

图 1 轿车车灯反射体示例

Fig. 1 Experiment of an automobile headlamp reflector

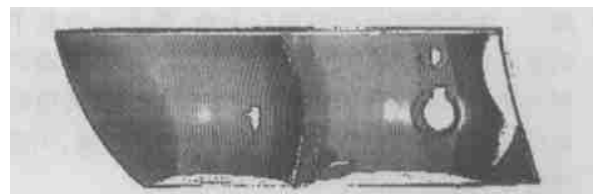
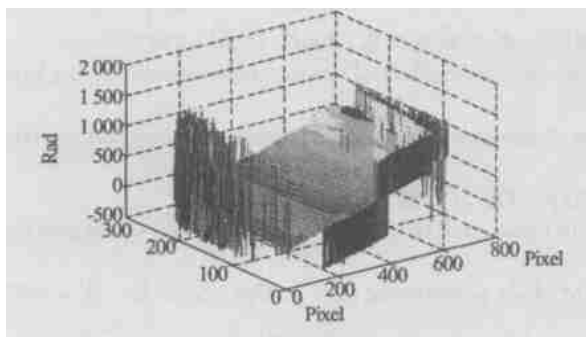


图 2 单视角条纹图(空白标识为无效区域)

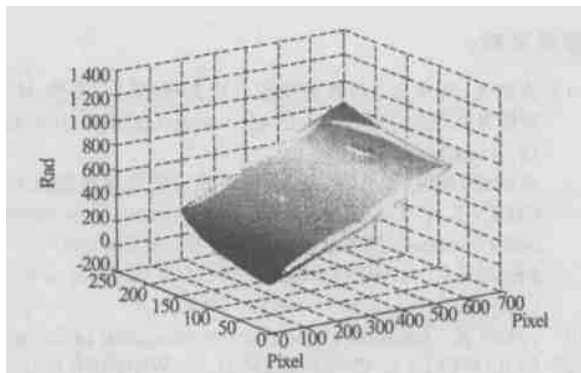
Fig. 2 Fringe pattern of the single view with invalid areas marked blank

的数据采用拼接原理, 用其他视角的数据来修补^[21-22]。

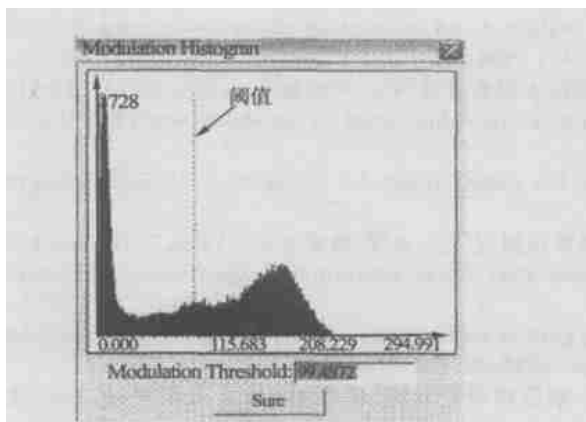
去除了无效测量区域的条纹图像见图 2。



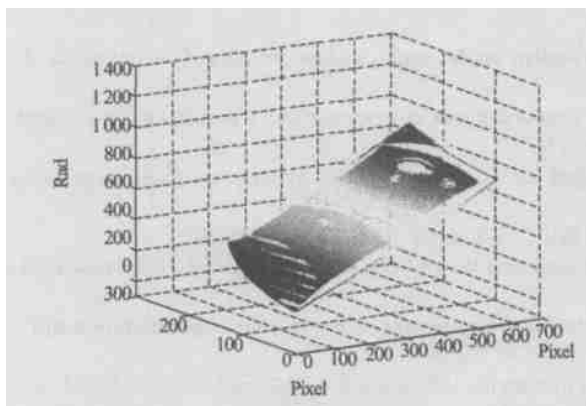
(a) 含有无效区域的相位分布
(a) Phase distribution with invalid areas



(d) 被不准确阈值分割的相位分布
(d) Phase distribution segmented by incorrect threshold



(b) 调制度直方图及自动获得的阈值
(b) Histogram of the modulation distribution and calculated threshold



(c) 自动分割后去除无效区域的相位分布
(c) Phase distribution without invalid areas which are segmented and identified automatically

图 3 无效区识别示例

Fig. 3 Example of identifying the invalid areas

图 3 所示是自动去除无效测量区的过程示意图, 其中 (a) 是包含无效测量区的时域相位去包裹的相位分布图; (b) 是调制度直方图及计算出的最佳阈值; (c) 是自动去除了无效测量区域的相位分布图; (d) 是人工选取的过小阈值分割的含有不可靠相位数据的相位分布图(图中可见在被测表面边缘处有“毛刺”)。

本次测量仅经过 6 次迭代就达到最优阈值。

5 结 论

本文提出了用迭代法求取调制度最佳阈值, 自动识别物体轮廓有效测量区的一种新方法。这种方法的特点是: (1) 采用迭代算法求解调制度直方图的最佳阈值, 使分割过程自动进行, 从而实现单视角测量全自动化, 减少了测量时间(本次单视角测量从去包裹、去除无效测量区域到最终获得三维坐标“点云”数据只花了几分钟), 提高了测量效率; (2) 除去了三维测量中“坏”区域的影响, 具有很好的健壮性, 不但可以用于投射条纹的三维测量中, 对于其他涉及条纹分析的领域特别是相移法测量也是适合的; (3) 单视角的测量中缺省的某些数据可以通过改变测量视角和拼接技术来修补, 有助于解决三维较复杂物体表面特别是含有遮挡阴影、孔洞、大倾斜表面的测量问题。

参考文献:

- [1] 吴晓波, 杨永琴. 图像测量技术的新应用[J]. 光学 精密工程, 1998, 6(3): 10-16.
WU X B, YANG Y Q. Image measuring technique and its development [J]. *Optics and Precision*, 1998, 6(3): 10-16. (in Chinese)
- [2] 陈晓荣, 蔡萍, 施文康. 光学非接触三维形貌测量技术新进展[J]. 光学 精密工程, 2002, 10(5): 528-532.
CHEN X R, CAI P, SHI W K. The latest development of optical non contact 3D profile measurement [J]. *Optics and Precision*, 2002, 10(5): 528-32. (in Chinese)
- [3] FRANK C, GORDON M B, MUMIN S. Overview of three dimensional shape measurement using optical methods [J]. *Opt. Eng.*, 2000, 39(1): 10-22.
- [4] ITOH K. Analysis of the phase unwrapping problem [J]. *Appl. Opt.*, 1982, 21(14): 2470-2474.
- [5] GOLDSTEIN R M, ZEBKER H A, WERNER C L. Satellite radar interferometry: two dimensional phase unwrapping [J]. *Radio Science*, 1988, 23(4): 713-720.
- [6] GHIGLIA D C, MASTIN G A. Cellular automata method for phase unwrapping [J]. *J. Opt. Soc. Am. A.*, 1987, 4(1): 267-280.
- [7] BONE D J. Fourier fringe analysis: the two dimensional phase unwrapping problem [J]. *Appl. Opt.*, 1991, 30(25): 3627-3632.
- [8] BUCKLAND J R, HUNTLEY J M. Unwrapping noisy phase maps by use of a minimum cost matching algorithm [J]. *Appl. Opt.*, 1995, 34(23): 5100-5108.
- [9] GHIGLIA D C, ROMERO L A. Robust two dimensional weighted and unweighted phase unwrapping that uses fast transforms and iterative methods [J]. *J. Opt. Soc. Am. A.*, 1994, 11(1): 107-117.
- [10] 韦春龙, 陈明仪, 王之江. 基于一维快速傅里叶变换的相位去包裹算法[J]. 中国激光, 1998, 25(9): 813-816.
. WEI CH L, CHEN M Y, WANG ZH J. Phase unwrapping algorithm based on one dimension FFT [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 1998, 25(9): 813-816. (in Chinese)
- [11] WEI CH L. Robust phase unwrapping algorithm in the flat measurement for phase stepping interferometry [J]. *SPIE*, 1998, 3558: 480-486.
- [12] 曹原, 韦春龙, 程维明, 等. 数字光学轮廓仪中相位去包裹算法研究 [J]. 光学 精密工程, 1999, 7(5): 100-105.
CAO Y, WEI CH L, CHENG W M, *et al.* Two dimensional phase unwrapping algorithms [J]. *Optics and Precision*, 1997, 7(5): 100-105. (in Chinese)
- [13] SU X Y, BALLY G V, VUKICEVIC D. Phase stepping grating profilometry: utilization of intensity modulation analysis in complex objects evaluation [J]. *Opt. Commun.*, 1993, 98: 141-150.
- [14] 黄文字, 龚建伟, 陆际联. 基于调制度分析的加权最小二乘位相展开方法 [J]. 北京理工大学学报, 2001, 21(2): 247-251.
HUANG W Y, GONG J W, LU J L. Weighted least square phase unwrapping utilizing intensity Modulation analysis [J]. *Journal of Beijing Institute of Technology*, 2001, 21(2): 247-251. (in Chinese)
- [15] 章毓晋. 图象分割 [M]. 北京: 科学出版社, 2001: 46-49.
ZHANG Y J. *Image segmentation* [M], Beijing: Science Press, 2001: 46-49. (in Chinese)
- [16] HUNTLEY J M, SALDNER H O. Temporal phase unwrapping algorithm for automated interferogram analysis [J]. *Appl. Opt.*, 1993, 32(17): 3047-3052.
- [17] SALDNER H O, HUNTLY J M. Temporal phase unwrapping: application to surface profiling of discontinuous objects [J]. *Appl. Opt.*, 1997, 36(2): 2770-2775.
- [18] SALDNER H O, HUNTLY J M. Profilometry using temporal phase unwrapping and a spatial light modulator based fringe projector [J]. *Opt. Eng.*, 1997, 36(1): 610-615.
- [19] HUNTLY J M, SALDNER H O. Error reduction method for shape measurement by temporal phase unwrapping [J]. *J. Opt. Soc. Am. A.*, 1997, 14(12): 3188-3196.
- [20] 胡小锋, 叶庆泰, 戴星. 一种精确检测细胞真实边缘的算法 [J]. 光学技术, 2003, 29(5): 595-598.
HU X F, YE Q T, DAI X. An algorithm for accurately detecting the real cell edge [J]. *Optical Technique*, 2003, 29(5): 595-598. (in Chinese)
- [21] CHEN M Y, CHENG W M, WANG C W. Multi aperture overlap scanning techniques for large aperture test [J]. *SPIE*, 1991, 1553: 626-635.
- [22] HE H T, CHEN M Y, GUO H W. Shape measurement of complex objects using connection techniques based on overlapping areas [J]. *SPIE*, 2003, 5180: 402-412.

作者简介: 何海涛(1974-), 男, 湖北武汉人, 上海大学精密机械工程系在读博士研究生, 主要研究方向为光学三维检测及逆向工程。E-mail: hsppear@citiz.net