

文章编号:1004-4213(2010)08-1443-6

基于二值化调制度层析的快速在线三维测量算法*

郑旭, 曹益平[†]

(四川大学 光电科学技术系, 成都 610064)

摘要:提出了一种基于二值化调制度层析的快速在线三维测量算法. 对物体调制度信息进行层析分析, 有效提取反映物体形状特征的层析信息, 并将该双准确度层析信息进行二值化, 以该二值化层析信息为模板, 进行像素匹配, 可实现快速在线三维测量. 为验证该算法的可行性和有效性, 进行了实物测试实验, 该算法与提取调制度特征区域实现像素匹配的方法进行对比测试. 实验表明, 该算法具有很好的测量准确度, 有效地调高了测量速度.

关键词:调制度; 在线测量; 像素匹配; 位相展开; stoilov 算法; 二值化

中图分类号: TN247

文献标识码: A

doi: 10. 3788/gzxb20103908. 1443

0 引言

随着工业自动化程度的不断提高, 流水线的应用越来越普遍, 实现快速在线三维测量越来越受到人们的关注. 傅里叶变换轮廓术 (Fourier Transform Profilometry, FTP)^[1], 相位测量轮廓术 (Phase Measuring Profilometry, PMP)^[2-3] 等传统的三维测量方法, 通常要求物体固定不动, 由于在线测量中物体相对 CCD 移动, 造成相移图之间对应的像素坐标和物点坐标的不一致, 此时传统方法无法实现相位解相, 不适合在线三维测量. 如果通过像素匹配使各帧图像物点像素坐标一一对应, 即可正确解相, 重构出物体的三维面形, 实现在线三维测量^[4-5]. 为此, 李坤提出了利用与物体面形有关的调制度特定分布区域作为标记的在线三维测量方法^[6], 然而, 该方法计算量大, 速度较慢, 标记信息在某些场合难以准确提取, 在一定程度上影响了其普适性. 本文分析提出了一种基于二值化调制度层析信息实现像素匹配的快速在线三维测量算法, 兔型物体为例, 利用本文方法进行实验, 各物点上最大误差的最大值是 0. 853 5 mm, 均方根值为 0. 031 8.

1 在线三维测量原理

在在线测量中, 被测物体是运动的, 如果借助像

素匹配, 实现物体移动和光栅移动的转化, 获得等效的相移效果, 即可实现在线三维测量. 在线三维测量原理如图 1, 将一固定正弦光栅投影到流水线中的

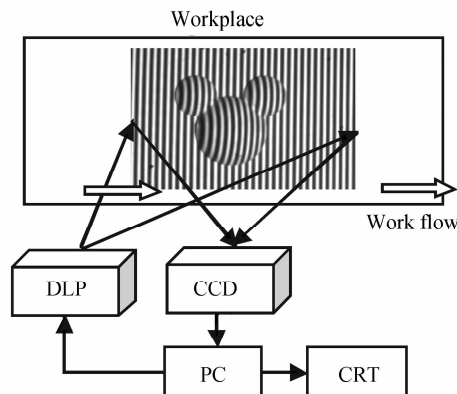


图 1 在线测量原理

Fig. 1 Schematic diagram of on-line system

被测物体上, 在物体 n 个等距离移动位置控制 CCD 对应采集 n 帧变形条纹图, 其对应变化位置 (x_n, y_n) 的光强表达式 $I_n(x_n, y_n)$

$$I_n(x_n, y_n) = R(x_n, y_n) \{ A(x_n, y_n) + B(x_n, y_n) \cdot \cos[\phi(x_n, y_n) + (n-1)\phi_0] \} \quad n=1, 2, 3, 4, 5 \quad (1)$$

式中 $R(x_n, y_n)$ 为物体表面反射率; $A(x_n, y_n)$ 为背景光强; $B(x_n, y_n)$ 为条纹对比度; $\phi(x_n, y_n)$ 为受物体高度调制的相位; ϕ_0 为物体等步距移动产生的等效相移. 对式(1)做傅里叶变换

$$G_n(f_x, f_y) = G_{n0}(f_x, f_y) + G_{n1}(f_x, f_y) + G_{-n1}(f_x, f_y) \quad n=1, 2, 3, 4, 5 \quad (2)$$

式中, $G_{n0}(f_x, f_y)$, $G_{n1}(f_x, f_y)$, $G_{-n1}(f_x, f_y)$ 分别为第 n 帧变形条纹的零级和正负一级谱. 采用空间滤波方法对滤出一级谱 $G_{n1}(f_x, f_y)$ 做逆傅里叶变换, 得

* 国家高技术研究发展计划(2007AA01Z333)、国家重大专项(2009ZX02204-008)和四川省学术和技术带头人培养基金(07GRC-01)资助

[†] Tel: 029-88204271 Email: caoyiping@mail.sc.cninfo.net
收稿日期: 2009-10-23 修回日期: 2010-02-25

$$P_n(x_n, y_n) = \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} G_{n1}(f_x, f_y) \exp[i2\pi(f_x x + f_y y)] df_x df_y = \frac{1}{2} R(x_n, y_n) B(x_n, y_n) \cdot \exp(i2\pi(f_x x + f_y y) + \varphi + \Delta_n) \quad (3)$$

调制度分布定义为 $P_n(x_n, y_n)$ 的模, 即

$$M_n(x_n, y_n) = \text{abs}[P_n(x_n, y_n)] = \frac{1}{2} R(x_n, y_n) B(x_n, y_n) \quad (4)$$

式中, 变形条纹的调制度信息反映了物体反射率分布 $R(x_n, y_n)$ 和投影光栅幅值分布 $B(x_n, y_n)$, 若保证投影光栅具有很好的均匀性, $B(x_n, y_n)$ 可视为常量, 因此调制度则较好地体现了物体面形的灰度信息, 当物体移动时, 对应位置的物体调制度也会整体相应移动, 因此, 李坤提出了一种无标记的在线三维测量方法, 根据物体的面形特点, 提取物体调制度分布具有某特定分布的区域为模板, 通过相关匹配实现对物体移动测量, 从而实现像素匹配. 然而, 变形条纹图的调制度分布 $M_n(x_n, y_n)$ 不仅包含物体本身调制度信息, 还包含参考平面调制度信息, 以及由光照引起的阴影区域调制度信息. 当所选模板含有阴影调制度信息时, 阴影区域调制度较低, 且随物体运动会发生改变, 导致各帧变形条纹图对应的调制度相似度明显降低, 会影响像素匹配准确度; 当所选模板含有参考平面调制度信息时, 由于参考平面调制度均很高且没有明显特征, 若将其参与计算, 会影响像素匹配速度. 特别是所选模板的需因物体形状、大小而异, 并且模板与其余几帧变形条纹图的整个调制度信息做相关运算, 参与计算的信息量较多, 既会影响像素匹配准确度又会影响像素匹配速度.

由于物体调制度一般介于阴影区域调制度和参考平面调制度之间, 若对物体调制度信息做层析处理, 有效排除阴影区域, 滤除参考平面调制度的影响, 自动在物体表面提取调制度可靠性较高, 并且真实反映物体面形特征信息的二值化调制度层析区域为像素匹配模板, 即可有效地提高在线三维测量的普适性, 又可提高三维重构计算速度, 具体算法为:

$$\begin{aligned} & \text{设 } \bar{M}_n \text{ 为 } M_n(x_n, y_n) \text{ 的平均调制度} \\ & \bar{M}_n = \frac{(M_{n\max} - M_{n\min})}{2} + M_{n\min} \\ & (n=1, 2, 3, 4, 5) \end{aligned} \quad (5)$$

式中, 为 $M_n(x_n, y_n)$ 的最大值, 为 $M_n(x_n, y_n)$ 的最小值. 根据每帧的 \bar{M}_n , 分别对每帧调制度设置两个阈值 T_{n1}, T_{n2} ($T_{n2} < T_{n1}$), 要求 T_{n1} 小于参考平面的调制度, T_{n2} 大于物体边缘阴影不连续部分的调制度, 则 T_{n1}, T_{n2} 之间的调制度自动定位在待测运动物体

上, 为了保证像素匹配准确度, T_{n1}, T_{n2} 取值为

$$\begin{cases} T_{n1} = \bar{M}_n + \epsilon_{n1} \\ T_{n2} = \bar{M}_n - \epsilon_{n2} \end{cases} \quad n=1, 2, 3, 4, 5 \quad (6)$$

式中 $\epsilon_{n1}, \epsilon_{n2} < \bar{M}_n$, $\epsilon_{n1}, \epsilon_{n2}$ 的取值直接影响在线匹配准确度. 因此, 通过大量实验分析, 要求每帧提取的调制度图像的层析厚度 $\epsilon_{n1} + \epsilon_{n2}$ 相等, 且 $\epsilon_{n1} + \epsilon_{n2}$ 在保证层析特征的前提下应尽可能的小, 通常小于 $10\% \bar{M}_n$. 则所提取的调制度层析信息为

$$S_n(x_n, y_n) = \begin{cases} M_n(x_n, y_n) & T_{n2} \leq M_n(x_n, y_n) \leq T_{n1} \\ 0 & \text{else} \end{cases} \quad n=1, 2, 3, 4, 5 \quad (7)$$

可见, 每帧层析有效信息在 T_{n1}, T_{n2} 之间, 层析厚度 $\epsilon_{n1} + \epsilon_{n2}$ 决定了参与计算的有效非零数, 当 $\epsilon_{n1} + \epsilon_{n2}$ 越小, 参与计算的有效非零数越少, 测量速度越快. 另外, 由于 $S_n(x_n, y_n)$ 为双准确度数信息, 众所周知, 相同条件下整数的计算速度高于双准确度数的计算, 为此, 对式(7)调制度层析信息进一步二值化处理, 即

$$S_{n0-1}(x_n, y_n) = \begin{cases} 1 & S_n(x_n, y_n) \neq 0 \\ 0 & S_n(x_n, y_n) = 0 \end{cases} \quad n=1, 2, 3, 4, 5 \quad (8)$$

然后, 截取式(8)的第1帧变形条纹调制度层析图 $S_{10-1}(x_1, y_1)$ 中的有效区域作为模板, 分别与第 n 帧 ($n=1, 2, 3, 4, 5$) 变形条纹图的二值化调制度层析图 $S_{n0-1}(x_n, y_n)$ 做相关运算, 相关度最大点的坐标反映了物体的移动, 从而实现像素匹配^[7]. 式(8)将式(7)的 $S_n(x_n, y_n)$ 双准确度数信息转换为值为1的整数, 原来复杂的双准确度数计算变为归一化的0-1整数计算, 提高了数据处理速度.

图2是以米奇头像为例的像素匹配过程示意图, 图2(a)是由CCD采集的第1帧和第2帧在线变形条纹图, 二者物点位置的对应像素坐标由于物体运动不一致, 其对应状态下的调制度分布如图2(b), 第1帧和第2帧的调制度分布在阴影区域发生了变化, 会影响像素匹配准确度. 通过上述层析算法对图2(b)分析处理, 得到图2(c)所示的对应二值化调制度层析分布图 $S_{10-1}(x_1, y_1)$ 和 $S_{20-1}(x_2, y_2)$. 以第1帧条纹像素坐标为参考标准, 截取图2(c)的第1帧 $S_{10-1}(x_1, y_1)$ 有效区域生成如图2(d)的模板, 该模板特征非常明显, 反映了物体的本征信息. 以此模板分别与图2(c)的第1帧和第2帧层析图做相关匹配运算, 得到两个最大相关点坐标, 两坐标的差值即为第2帧相对第1帧对应物点的像素坐标改变量, 也即物体位移量. 根据位移量, 平移第2帧变形条纹图此位移像素值, 便可使第2帧变形条纹图的

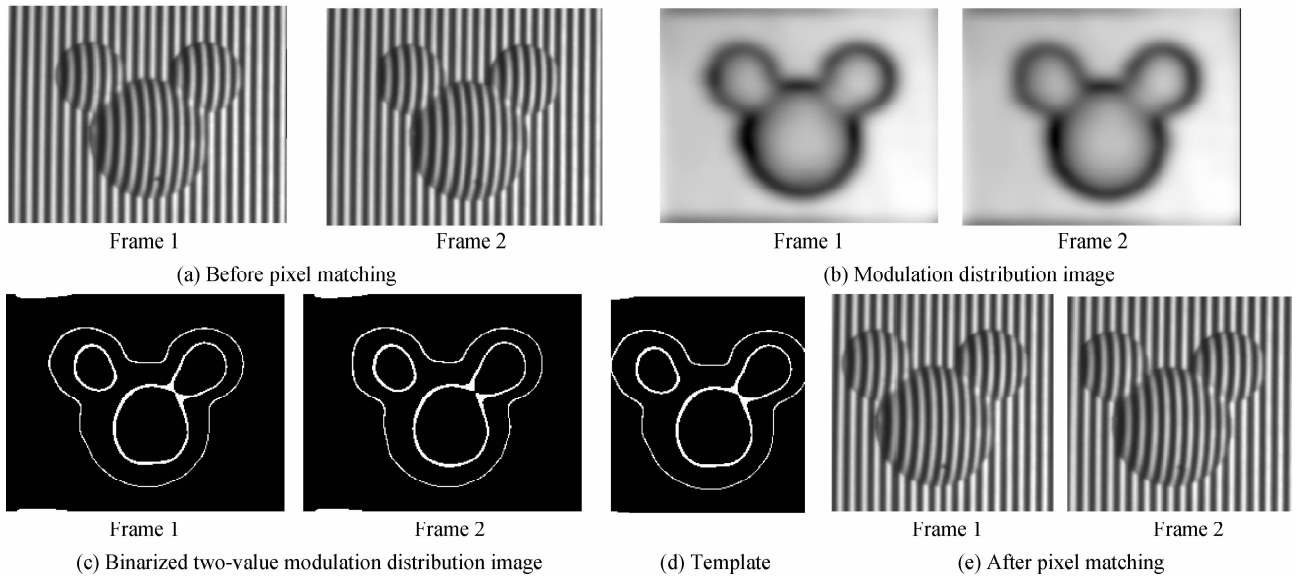


图2 像素匹配

Fig. 2 Pixel matching

物点像素坐标与第1帧变形条纹图的物点像素坐标一一对应,此处采用图像裁剪的方法,提取出如图2(e)所示的等效相移变形条纹图 $I'_1(x_1, y_1)$ 和 $I'_2(x_1, y_1)$. 同理,像素匹配获取第3至 n 帧变形条纹图的等效静态相移条纹图: $I'_3(x_1, y_1), I'_4(x_1, y_1), \dots, I'_n(x_1, y_1)$. 利用 $I'_1(x_1, y_1), I'_2(x_1, y_1), \dots, I'_n(x_1, y_1)$ 等效相移条纹图,即可通过等步长相移算法计算运动物体运动产生的等效相移量 Φ_0 和受物体调制的相位 $\Phi(x_1, y_1)$. 在等步长相移算法中, Stoilov 算法测量准确度较高,因此采用本实验室改进的 Stoilov 算法^[8-9]求解得相位分布 $\Phi(x_1, y_1)$ 和等效相移量 Φ_0 为

$$\Phi(x_1, y_1) = \arctan \left[\frac{2(I'_2(x_1, y_1) - I'_1(x_1, y_1))}{2I'_3(x_1, y_1) - I'_1(x_1, y_1) - I'_5(x_1, y_1)} \sin \Phi_0 \right] \quad (9)$$

$$\sin \Phi_0 = \sqrt{1 - \left[\frac{I'_1(x_1, y_1) - I'_5(x_1, y_1)}{2(I'_2(x_1, y_1) - I'_4(x_1, y_1))} \right]^2} \quad (10)$$

式(9)的反正切计算,使相位 $\Phi(x_1, y_1)$ 被截断在 $(-\pi, \pi)$ 之间,本文采用洪水展开算法将截断相位 $\Phi(x_1, y_1)$ 展开为连续相位 $\psi(x_1, y_1)$,再采用校准的方法建立起相位与高度之间的映射关系^[10-11],就可以重构物体高度分布 $h(x_1, y_1)$

$$\frac{1}{h(x_1, y_1)} = a(x_1, y_1) + b(x_1, y_1) \frac{1}{\psi(x_1, y_1)} + c(x_1, y_1) \frac{1}{\psi^2(x_1, y_1)} \quad (11)$$

式中 $a(x_1, y_1), b(x_1, y_1), c(x_1, y_1)$ 三个参量是通过平面标定获得,从而实现物体的在线三维检测.

2 实验结果及分析

为了验证本文所提在线三维测量算法的可行性

和有效性,进行了大量的实物测试实验,并将本文算法和李坤提出的方法对比实验. 实验系统如图1,其中,数字光投影仪 DLP 型号为 CP-HX6500, CRT 为显示器, CCD 的选择取决于在线测量中物体运动的速度,本实验选择的 CCD 型号为 MTV1881EX, 其帧率为 60 帧/s,曝光时间可以在 1/50~1/10 000 s 选择,本实验选定的曝光时间为 1/500s. 由计算机产生一幅固定的正弦条纹图,控制 DLP 将其投影到载物台的被测物体上,由 SC300-1A 型控制器控制载物台移动,按等步距设置移动量,发送等间距移动信号,控制 CCD 同步采集对应的变形条纹图,经图像采集卡采集,在 Inter(R)Core(TM)2 Duo CPU E7300 @2.66GHz,内存 2G 的计算机平台上处理. 以图3的米奇型、心型和兔型物体的在线三维测量对比实验分析为例,图4是采用本文算法对图3物体的在线测量的三维重构结果,图5是采用文献[6]提出的无标记在线测量方法对图3物体的在线三维重构结果,表1是文献[6]算法与本文算法的运行时间比较数据. 从图可以看出本文的像素匹配准确度优于李坤方法. 由于模板的选取影响像素匹配的准确度,本文模板匹配准确度受 $\epsilon_{n1}, \epsilon_{n2}$ 的取值影响,而文献[6]模板取决于物体面形的特征,因此两种模板的选取在一定范围内具有多样性. 若在可靠像素匹配区域内,采用本文和文献[6]的算法分别选取多种 ($N=10$) 模板对物体进行十次测量,对应物点上的平均值作为物体理想面形,以其为标准可实现误差分析. 以图3(c)的兔型物体为例,采用本文方法进行重复实验,对应物点上的最大误差如图6. 图6(a)是文献[6]方法的各物点上最大误差,其最大值为 0.853 5 mm,均方根为 0.031 8,平均值为 0.023 7;

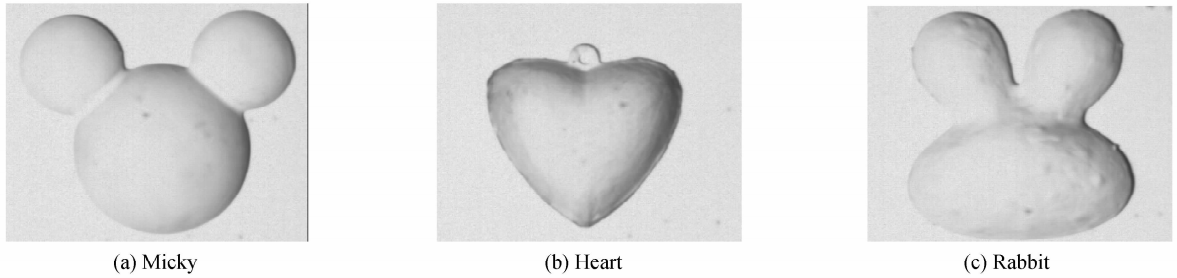


图3 实物图
Fig. 3 Objects

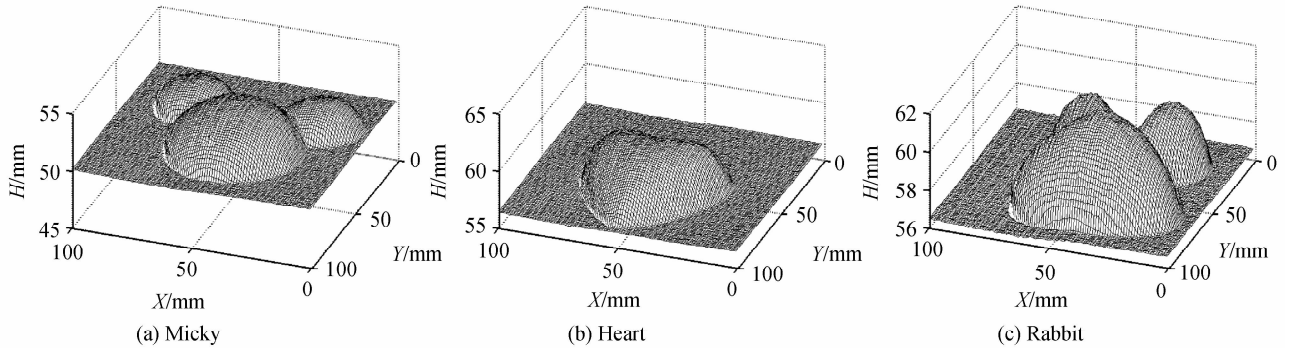


图4 本文算法获得的重构物体
Fig. 4 Reconstructed objects obtained using the proposed algorithm

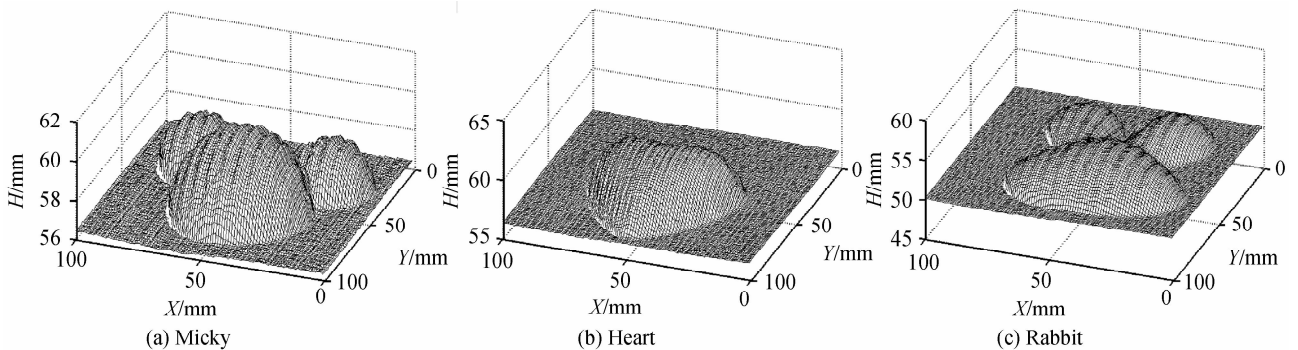


图5 利用文献[6]方法重构物体
Fig. 5 Reconstructed objects obtained using the algorithm in Ref. [6]

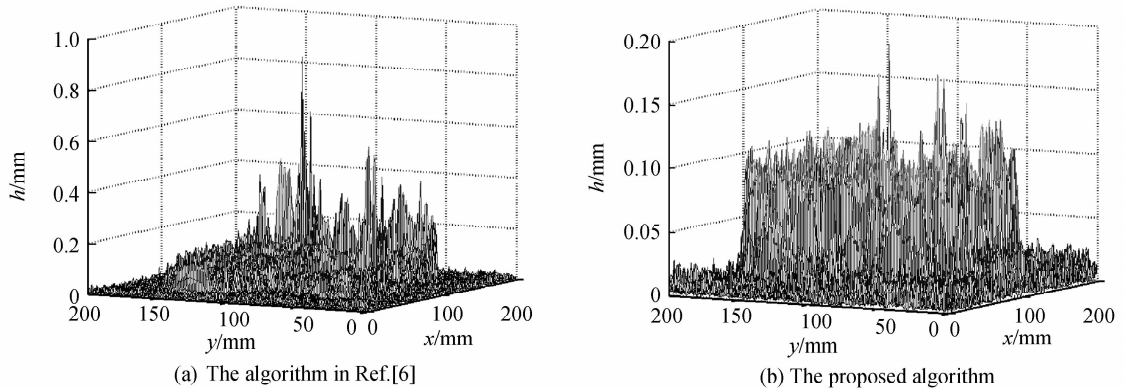


图6 误差图
Fig. 6 Error distribution

表1 像素匹配时间对比(s)

Table 1 Comparison results in pixel match/s

Measured object	Fig. 3(a)	Fig. 3(b)	Fig. 3(c)
Li Kun's algorithm	5.234 0	5.290 6	5.486 1
Proposed algorithm	2.042 0	2.126 5	2.069 3

图6(b)是本文算法的对应物点上最大误差,其最大值仅为0.184 0 mm,均方根为0.021 9,平均值为0.018 3.可见,本文算法无论在最大误差、均方根和平均值都优于文献[6]算法.实验结果显示,采用本文算法不仅可以很好的重构在线运动的物体,有效

提高了在线测量速度,并且像素匹配准确度明显优于文献[6]算法,从而验证了该快速在线三维测量算法的可行性和有效性。

3 结论

本文将物体调制度信息用于在线三维测量,分析了调制度信息应用在在线三维测量中所出现的速度和准确度问题,讨论了对物体调制度信息层析处理的有效性,研究了通过二值化处理层析区域,使双准确度信息转换为值为二元化整数信息,以此为模板实现了快速准确的在线三维测量,用实验验证了该基于二值化调制度层析的快速在线三维测量算法的可行性和有效性,该算法既提高了在线三维测量的普适性,又提高了在线三维测量速度。

参考文献

- [1] SU Xian-yu, CHEN Wen-jing, ZHANG Qi-can, *et al.* Dynamic 3-D shape measurement method based on FTP[J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2001, **36**(1): 49-64.
- [2] SONG Wan-zhong, SU Xian-yu, CAO Yi-ping, *et al.* A new method of three-dimensional coordinates calibration in Phase Measuring Profilometry[J]. *Acta Optica Sinica*, 2003, **23**(3): 273-277.
宋万忠,苏显渝,曹益平,等.相位测量轮廓术中三维坐标校准新方法[J].*光学学报*,2003,**23**(3):273-277.
- [3] YING Chao-fu, SU Xian-yu, LIU Yuan-kun. Noise reduction based on sub-pixel phase-shift algorithm in PMP[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2008, **37**(6): 1148-1150.
应朝福,苏显渝,刘元坤. PMP 中基于亚像素相移的噪音抑制算法[J].*光子学报*,2008,**37**(6):1148-1150.
- [4] YU Rui-zhi, CAO Yi-ping. A three dimensional on-line inspecting method for workpiece by PMP[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2008, **37**(6): 1139-1143.
喻睿智,曹益平.一种采用相位测量轮廓术的工件在线三维检测新方法[J].*光子学报*,2008,**37**(6):1139-1143.
- [5] YONEYAMA S, MORIMOTO Y, FUJIGAKI M, *et al.* Phase-measuring profilometry of moving object without phase-shifting device[J]. *Opt Lasers Eng*, 2003, **40**(3): 153-161.
- [6] LI Kun, CAO Yi-ping, CHEN Yong-quan, *et al.* A new method for online three dimensional inspection without marked [J]. *Optics & Optoelectronic Technology*, 2009, **7**(2): 57-61.
李坤,曹益平,陈永权,等.一种无需标记的在线三维测量[J].*光学与光电技术*,2009,**7**(2):57-61.
- [7] CHEN Shen-yi, QIAN Hui, WU Zheng, *et al.* Fast normalized cross-correlation for template matching [J]. *Chinese Journal of Sensors and Actuators*, 2007, **20**(6): 1326-1329.
陈沈轶,钱徽,吴铮,等.模板图像匹配中互相关的一种快速算法[J].*传感器技术学报*,2007,**20**(6):1326-1329.
- [8] QIAN Ke-mao, WU Xiao-ping. Theoretical analysis of Stoilov algorithm in phase shifting interferometry [J]. *Optical Technique*, 2001, **27**(1): 13-16.
钱克矛,伍小平.相移技术中五步等步长 Stoilov 算法的性能分析[J].*光学技术*,2001,**27**(1):13-16.
- [9] XU Xing-fen, CAO Yi-ping. Improved stoilov algorithm based on statistical approach[J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(3): 733-737.
许幸芬,曹益平.基于统计逼近的 Stoilov 改进算法[J].*光学学报*,2009,**29**(3):733-737.
- [10] YANG Jia, JIA Shu-hai. A novel method of three dimensional profile measurement[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2007, **36**(6): 972-975.
杨佳,贾书海.一种新的三维轮廓测量方法[J].*光子学报*,2007,**36**(6):972-975.
- [11] ZHOU Can-lin, LI Fang. A novel calibration technology in profilometry[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2005, **34**(5): 761-764.
周灿林,李方.一种新的形貌检测系统标定技术[J].*光子学报*,2005,**34**(5):761-764.

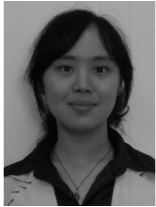
A Fast On-line 3D Measuring Algorithm Based on Two-value Modulation Delamination

ZHENG Xu, CAO Yi-ping

(*Department of Optoelectronics, Sichuan University, Chengdu 610064, China*)

Abstract: A new method of fast on-line 3D measurement is proposed. A modulation delamination method is used to extract a token from object modulation distributions. With the token delamination information transformed into integer as the mask, the equivalent phase-shift deformed patterns at the same pixel coordinate can be realized by the pixels matching, which puts the fast on-line 3D measurement into practice. To verify its feasibility and validity, a contrast experiment on this method and a method based on a particular region of modulation distributions are carried on. Experiments show that the high-veracity of the algorithm and the speed of on-line inspection can be effectively improved.

Key words: Modulation; On-line measurement; Pixel matching; Phase unwrapping; Stoilov phase shifting algorithm; Two-value processing



ZHENG Xu was born in 1986. Now she is pursuing her M. S. degree at Optoelectronics Department of Sichuan University, and her research interests focus on optical information processing and 3D information inspecting etc.



CAO Yi-ping was born in 1962. He received his Ph. D. degree from Sichuan University. Now he is a professor and Doctoral Supervisor, and his research interests focus on optical three-dimensional inspection, optical information processing and opto-mechatronics etc.