

文章编号 1004-924X(2009)05-1057-06

线结构光条纹中心的全分辨率精确提取

熊会元, 宗志坚, 陈承鹤

(中山大学 工学院 现代设计技术中心, 广东 广州 510275)

摘要:激光条纹中心的提取是线结构光坐标测量系统的关键技术之一, 本文对条纹中心的高分辨率精确提取进行了研究。首先, 基于阈值法全分辨率提取条纹初值中心; 然后, 在条纹初值中心域应用灰度梯度与 Bazen 方法计算条纹法向, 最后在法线方向精确获取光条纹能量中心。采用分辨率为 768×576 的相机, 应用 V 形检测块进行对比实验, 结果表明: 提取的中心点分辨率为 1 086 点, 比传统方法增加了 42.5%, 且无冗余点; 中心点到由中心点拟合的直线的平均距离最小, 分别为 0.294 与 0.306 7 pixel; 条纹法向计算精确, 计算时间为 75.8 ms。该方法避免了被测体表面曲率变化大、提取中心密度小等问题, 提取的精度与鲁棒性高, 满足在线精确测量要求。

关键词:线结构光; 灰度梯度; 三维测量

中图分类号: TP391; TN247 **文献标识码:** A

Accurately extracting full resolution centers of structured light stripe

XIONG Hui-yuan, ZONG Zhi-jian, CHEN Cheng-he

(Modern Design Technology Center, Engineer School of Sun Yatsen University, Guangzhou 510275, China)

Abstract: Extracting the center of a stripe is one of the key techniques of a structured light measurement system. An approach to increase the extracting resolution for the centers of a laser stripe and the extracting precision is investigated. Firstly, full resolution initial centers of the light stripe is presented based a threshold algorithm. Then, the gray grades of the field along the initial points of the stripe are calculated with a Sobel operator, and the normal direction at the initial points of the stripe is calculated by the Bazen method. Finally, the energy centers of the stripe are accurately gained in the normal direction. A contrast experiment in the V-shaped test block with a camera in resolution of 768×576 indicates that the resolution of the centers is 1086 dots without redundance, and the number of effective dots has increased by 42.5% as compared with that of barycenter method. In addition, the average distance between the extracting corners and the line fitted by the extracting centers is the shortest one, only 0.294 and 0.306 pixel. The proposed method can calculate exactly the normal direction of the stripe, and computing time is 75.8 ms. Experiments show that the approach can avoid a mini density for a large curvature surface of the measured object and can get full resolution centers, it is suitable for online accurate measurements.

Key words: line structured light; gray grade; 3D measuring

收稿日期: 2008-06-16; 修订日期: 2008-08-25.

基金项目: 广东省科技计划项目 (No. 2006B12101002); 国家企业技术创新基金资助项目 (No. 08C26214411233)

1 引言

线结构光测量由于其成本低、体积小、重量轻、方便灵活等特点,在三维视觉测量与检测中获得了广泛应用,尤其是在汽车、玩具、医学、家电与模具等行业^[1]。线结构光测量是基于激光三角法原理的一种非接触式测量,其原理^[2]是激光器产生线激光照射到被测物体,摄像机从一定角度获取被测物体调制后的光条信息,然后测量系统依据摄像机光条信息反求出线激光照射处被测物体的三维坐标,因而在条纹图像中获取的线条中心将直接影响物体表面坐标的测量精度。

国内外学者主要通过提高线结构光视觉传感器摄像机的分辨率和采用高精度提取条纹图像中心算法等两种方法来提高条纹中心提取的精度。前者是通过增加成像系统的元件或辅助细分技术来提高摄像机的分辨率;该方法成本高,实施较为困难,采用高分辨率摄像机或辅助细分技术会增加数据处理时间,降低成像的频率,直接影响线结构光测量的速度。后者则通过软件算法对条纹图像进行数据处理,突破像元间距的限制,提高条纹中心的提取精度;方法应用较为灵活,在摄像机分辨率一定的情况下,能有效地提高条纹中心像点的获取精度。本文在分析现有条纹中心提取算法的基础上,提出了一种光条纹中心的全分辨率精确提取算法,在统一的实验平台对常用算法进行了对比实验,实验验证了算法的正确性,且精度高,速度满足在线测量要求。

2 现有算法分析

线结构光是由激光器产生的点光源经圆柱透镜调制后形成的单色线激光。图 1 为面罩在三坐标激光测量机上测量时的图片,图 2 为此时刻 CCD 所获得的条纹图像。理想状况下,激光条纹光强符合高斯分布,其数学表达式为:

$$G(x) = \frac{A}{\sqrt{2\pi}\sigma} \exp\left[-\frac{(x-u)^2}{2\sigma^2}\right], \quad (1)$$

式中, A 为幅值,表示曲线高度; σ 为标准差,代表曲线跨度; u 为均值,即为条纹中心。

测量过程中,条纹灰度会受被测物体的光洁度、材料、反光特性、远近以及噪声等影响,特别是

在被测物表面曲率变化较大时,其光条光强就不符合正态分布^[3],因而条纹中心的精确提取一直受到国内外学者的关注。



图 1 实物测量图

Fig. 1 Measuring scene

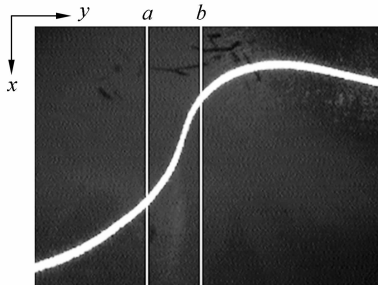


图 2 条纹图像图

Fig. 2 Structured light stripe image

传统的提取中心算法可分为两类^[4]: 1) 提取光条的几何中心法,如阈值法、中心法等; 2) 提取光条的能量中心法,如极值法、重心法、拟合法等。提取几何中心算法简单,运行速度快,但精度低,受阈值与噪声影响较大。极值法原理是获取光强曲线的最大灰度值。重心法是计算光强的重心,其精度相对极值法有较大提高,但同样受环境光、噪声、激光强度等影响较大。拟合法是在图像去噪后,对光强分布的离散点进行多项式、NUBUS 曲线或 B 样条曲线拟合来求得光强分布,后用重心法求中心,该方法精度较高,受外界影响较小。

以上方法是基于图像中某一行或列的灰度分布来计算该行或列上的条纹中心。如图 2 所示 a 或 b 列,其获取中心的分辨率完全由摄像机的行或列确定。从图 1 中面罩鼻梁处可以看出,由于其表面曲率变化大(a 与 b 列之间),其条纹图像几乎与 x 平行,由于受激光的叠加与散射影响,

此时在列方向上的灰度值分布不满足高斯分布^[5]。因而,上述方法一方面提取精度不高;另一方面,曲率变化较大处需要更多的测量有效点,但上述方法获取的点反而更少。

为解决测量物体表面曲率变化较大时的条纹中心提取,很多学者提出了新方法。胡斌^[6]利用方向模板获取光条中心,但该方法不能提高条纹分辨率,且精度不高。吴庆阳^[7]等改进了方向模板法,先细化所获条纹的骨架,应用方向模板确定光条法向,再结合重心法求光条中心。该方法提取骨架容易产生分叉,必须进行剪枝,计算量大,易产生冗余点,且法向计算误差较大。STEGER C^[8]应用 Hessian 矩阵计算光条的方向。胡坤等^[9]又对 STEGER C 方法的计算效率进行了改进,但 Hessian 方法计算量大,较难适应在线快速测量。

3 本文方法

本文提出了一种基于图像灰度梯度的条纹中心全分辨率精确提取方法。其原理如图 3 所示,首先基于灰度阈值法,利用条纹在行与列上的分布情况提取条纹全分辨率中心点,并作为初值,然后在初值点计算条纹法向,最后,在条纹法向上精确获取条纹的能量中心。

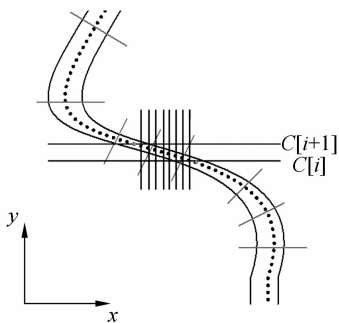


图 3 方法原理图

Fig. 3 Approach principle

3.1 条纹中心初值全分辨率提取

用传统方法提取条纹中心的分辨率会受曲率影响将导致条纹长度方向上的提取密度不均,大曲率处提取点较少等问题。本方法则根据条纹的行与列的分布特性,基于灰度阈值法实现条纹中心沿条纹方向均匀地全分辨率快速提取。基本原

理如下:

(1)沿 y 方向应用灰度阈值法依次获取条纹中心:

$$\begin{aligned} c[i]_{.y} &= i \\ c[i]_{.x} &= u_j \end{aligned} \quad (0 \leq i < V, 0 \leq j < U). \quad (2)$$

式中 $c[i]$ 为条纹中心数组, U 和 V 分别为摄像机上图像在 x, y 方向的最大分辨率, u_j 为条纹在 $y = i$ 时 x 方向上的几何中心。

(2)依次计算 $K = |c[i+1]_{.x} - c[i]_{.x}|$, 若 $K > 1$, 且 $c[i+1]$ 与 $c[i]$ 中点处图像灰度

$$f\left(\frac{c[i+1]_{.x} + c[i]_{.x}}{2}, \frac{c[i+1]_{.y} + c[i]_{.y}}{2}\right) > \epsilon, \quad (3)$$

(式中 ϵ 为灰度域值), 则在 $c[i+1]$ 与 $c[i]$ 之间沿 x 方向应用灰度阈值法提取 $K - 1$ 个中心点, 并插入条纹中心数组, 如图 3 黑色小点所示, 这样就可以均匀地提取条纹方向上所有的中心点。

3.2 条纹法向计算

设 $f(i, j)$ 为初值条纹上中心点邻域内 (i, j) 点的灰度值, 则该点处条纹方向计算如下。

(1) 计算点 (i, j) 的梯度矢量 $[G_x, G_y]^T$:

$$[G_x, G_y]^T = \left[\frac{\partial f}{\partial x}, \frac{\partial f}{\partial y} \right]^T, \quad (4)$$

采用 Sobel 梯度算子计算 (i, j) 点在 x 方向与 y 方向上的梯度 G_x 与 G_y , 其算子如图 4 所示:

1	0	-1
2	0	-2
1	0	-1

x方向模板

1	2	1
0	0	0
-1	-2	-1

y方向模板

图 4 Sobel 算子

Fig. 4 Sobel operator

(2) 采用 Bazen^[10]方法计算光条在点 (i, j) 处的法向:

取以 (i, j) 为中心的 $w \times w$ 子块, 计算点 (i, j) 的方向 $\theta(i, j)$:

$$v_x(i, j) = \sum_{u=i-\frac{w}{2}}^{i+\frac{w}{2}} \sum_{v=j-\frac{w}{2}}^{j+\frac{w}{2}} (G_x^2(u, v) - G_y^2(u, v)), \quad (5)$$

$$v_y(i, j) = \sum_{u=i-\frac{w}{2}}^{i+\frac{w}{2}} \sum_{v=j-\frac{w}{2}}^{j+\frac{w}{2}} 2G_x(u, v)G_y(u, v), \quad (6)$$

$$\theta(i, j) = \frac{1}{2} \tan^{-1} \frac{v_y(i, j)}{v_x(i, j)}, \quad (7)$$

其中 $G_x \neq 0$ 且 $G_y \neq 0$ 。如 G_x 或 G_y 为 0, 则其方向角为 0。

这样光条在点 (i, j) 处的法向为 $T(i, j)$:

$$T(i, j) = \theta(i, j) + \frac{\pi}{2}. \quad (8)$$

3.3 获取条纹精确中心

设条纹初始中心点为 (x_0, y_0) , 光条宽度为 λ , 则条纹法向上的精确能量中心为:

$$(x_0 + n_x, y_0 + kn_x) = \frac{\sum_{m=-\frac{\lambda}{2}}^{\frac{\lambda}{2}} f(x_0 + m, y_0 + km) \cdot m}{\sum_{m=-\frac{\lambda}{2}}^{\frac{\lambda}{2}} f(x_0 + m, y_0 + km)}$$

$$(\theta \in (-\frac{\pi}{2}, -\frac{\pi}{4}]) \cup [\frac{\pi}{4}, \frac{\pi}{2}), \quad (9)$$

$$(x_0 - \frac{1}{k}n_y, y_0 + n_y) = \frac{\sum_{m=-\frac{\lambda}{2}}^{\frac{\lambda}{2}} f(x_0 - \frac{1}{k}m, y_0 + m) \cdot m}{\sum_{m=-\frac{\lambda}{2}}^{\frac{\lambda}{2}} f(x_0 - \frac{1}{k}m, y_0 + m)}$$

$$(\theta \in (-\frac{\pi}{4}, \frac{\pi}{4})). \quad (10)$$

式中 k 为光条法向斜率。

4 实验与分析

应用 Visual C++ 6.0 实现本文方法、文献 [7] 所述方法与重心法。在自主研发的桌面式三坐标激光测量机 (见图 1) 上进行了实验, 实验采用的摄像机为 WAT902B (分辨率为 768×576), 16 mm 镜头, 西安华科 650 nm 激光光源, 计算机为 CPU Pentium 2.8, 内存 512 M。图 5~7 分别为采用本方法、文献 [7] 所述方法与重心法提取图 2 面罩上鼻尖处的条纹中心图, 图中条纹旁边椭圆部分图像为条纹上椭圆部分的 4 倍放大图。可以看出, 本文方法计算速度较快 (时间 76 ms), 获取条纹中心为全分辨率 (条纹分辨率 897 点), 无冗余点, 条纹法向计算精确 (图中条纹上白色小线段), 提取中心光顺性好, 抗干扰强; 重心法速度快 (时间 26 ms), 但抗干扰差, 分辨率小 (分辨率

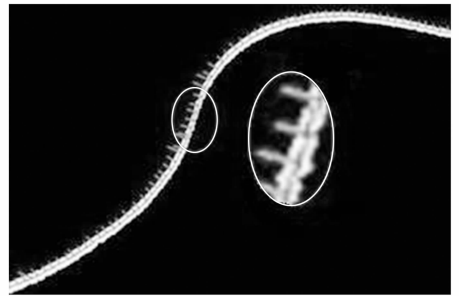


图 5 本文方法提取的中心图

Fig. 5 Results with the approach in this paper

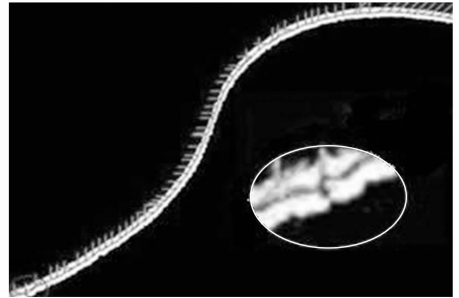


图 6 文献 [7] 所述方法提取的中心图

Fig. 6 Results with the approach in reference [7]

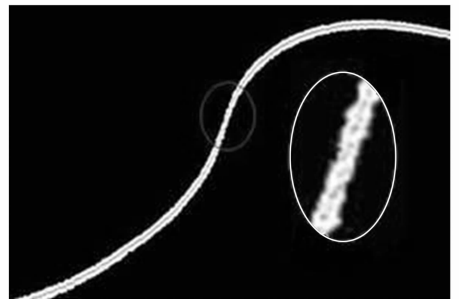


图 7 重心法提取的中心图

Fig. 7 Results with bar center approach

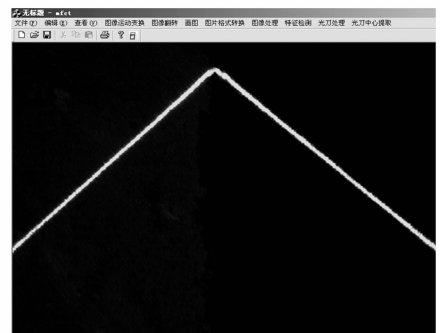


图 8 V 形测试块的实验图像

Fig. 8 Experimental image of V-shaped testing block

767点),特别是大曲率处提取点少,且不光顺(见放大图)。而文献[7]方法计算时间较长(时间96ms),提取的条纹方向存在误差(图中条纹上白色小线段),且条纹中心存在分叉,中心冗余点较多(分辨率1033点),需进一步应用剪枝算法。

为进行精度对比实验,本文采用了精密加工的两相交平面的V形检测块,其条纹中心在平面

应该为一条直线,通过拟合条纹中心直线方程,对比中心点到直线的平均距离,比较了算法的鲁棒性与精度。图8为V形检测块测量时的图像,分别用上述方法进行实验。表1为实验结果比较表,从表中可以看出,本方法精度与分辨率较高,计算时间满足测量要求。图9为应用本文算法测量获得的面罩点云图。

表1 对比实验结果表

Tab.1 Comparison of experimental results

	重心法	文献[7]	本文方法
条纹分辨率(dot)	762	1133	1086
计算时间(ms)	19.4609	84.9812	75.8
拟合的直线方程	$y = -1.065956 * x + 414.483156$ $y = 1.174296 * x + 306.218185$	$y = -1.066655 * x + 415.144611$ $y = 1.174824 * x + 306.573621$	$y = -1.065880 * x + 414.0995725$ $y = 1.174935 * x + 306.603313$
中心点到直线的平均距离(pixel)	0.415723, 0.506867	0.382302, 0.400599	0.294025, 0.306714
角点图像坐标(pixel)	48.327140, 362.96855	48.437210, 363.478818	47.971947, 362.967233



图9 测量面罩点云图

Fig.9 Point cloud of measured domino

5 结论

本文提出的基于图像灰度梯度的线结构光条纹全分辨率精确提取方法,有效地实现了不同曲率的光条纹全分辨率精确提取,条纹中心提取的精度与稳定性较高。面罩鼻尖条纹提取对比实验表明其法向计算精确,条纹中心分辨率为897点,提高分辨率的同时也避免了冗余点。V形检测块条纹中心提取对比实验表明,本方法提取的分辨率比重心法提高了42.5%,而基于细化方法则有冗余的47个分叉坏点;同时其提取的中心点到拟合直线的平均距离最小,分别为0.294与0.306 pixel,证明算法有更好的精度与鲁棒性,计算时间为75.8ms,适用于在线精确测量。

参考文献:

- [1] 薛婷,吴斌,张涛,等. 基于线结构光视觉传感器的圆孔定位误差分析[J]. 光学精密工程,2008,16(4):624-629.
XUE T, WU B, ZHANG T, et al.. Analysis on round-hole orientation error based on structured light stripe vision sensor[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2008,16(4):624-629. (in Chinese)

- [2] 贺忠海,王宝光. 线结构光传感器的模型及成像公式[J]. 光学精密工程,2001,9(3):269-271.
HE ZH H, WANG B G. Model and imaging formula of the line structured light sensor[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2001,9(3):269-271. (in Chinese)
- [3] 解则晓,张成国,张国雄. 基于B样条迭代法的激光光条噪声去除技术研究[J]. 光学技术,2005,31(3):430-433.
XIE Z X, ZHANG CH G, ZHANG G X. Research on removing the noise on the laser stripe based on

- the iterative fitting of B spline[J]. *Optical Technique*, 2005, 33(3): 430-433. (in Chinese)
- [4] 隋连升, 李兵, 蒋庄德. 基于 NURBS 曲线插值的激光光刀图像中心提取方法的研究[J]. *中国激光*. 2003, 30(10): 933-936.
SUI L SH, LI B, JIANG ZH D. Research on method of laser knife center position extracting based on NURBS interpolation[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2003, 30(10): 933-936. (in Chinese)
- [5] 李和平, 李德华, 朱洲, 等. 基于遗传算法的结构光条纹中心检测方法[J]. *光学精密工程*. 2004, 12(1): 82-87.
LI H P, LI D H, ZHU ZH, *et al.*. Detection of structured light strip center line based on genetic algorithm[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2004, 12(1): 82-87. (in chinese)
- [6] 胡斌, 李德华, 金刚, 等. 基于方向模板的结构光条纹中心检测方法[J]. *计算机工程与应用*, 2002, 11: 59-60.
HU B, LI D H, JIN G, *et al.*. New method for obtaining the center of structured light stripe by direction template [J]. *Computer Engineering and Applications*, 2002, 38(11): 59-60. (in Chinese)
- [7] 吴庆阳, 苏显渝, 李景镇, 等. 一种新的线结构光光带中心提取算法[J]. *四川大学学报*, 2007, 39(4): 151-155.
WU Q Y, SU X Y, LI J ZH, *et al.*. A new method for extracting the centre-line of line structure light-stripe[J]. *Journal of Sichuan University*, 2007, 39(4): 151-155. (in Chinese)
- [8] STEGER C. An unbiased detector of curvilinear structures[J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 1998, 20(2): 113-125.
- [9] 胡坤, 周富强, 张广军. 一种快速结构光条纹中心亚像素精度提取方法[J]. *仪器仪表学报*, 2006, 27(10): 1326-1329.
HU K, ZHOU F Q, ZHANG G J. Fast extrication method for subpixel center of structured light stripe [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2006, 27(10): 1326-1329. (in Chinese)
- [10] BAZEN A M, GEREZ S H. Systematic methods for the computation of the directional fields and singular points of fingerprints [J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2002, 24(7): 905-918.

作者简介:



熊会元(1973—),男,湖北武汉人,讲师,2003年于华中科技大学获得硕士学位,现为中山大学工学院博士研究生,主要从事机器视觉,精密测量及CAD的研究。E-mail: xionghy@mail.sysu.edu.cn



陈承鹤(1985—),男,广东梅州人,中山大学 06 交通工程专业本科生。E-mail: chenchenghe@126.com

导师介绍:



宗志坚(1963—),男,江西南昌人,教授,博士生导师,1984、1993、1996年分别于西北工业大学、南京航空航天大学以及华中科技大学获学士、硕士、博士学位,主要从事机械系统建模与仿真、电动汽车、精密测量等方面的研究。E-mail: zhongzhj@21cn.net