

DOI: 10.3901/JME.2008.11.215

结构光直线光条图像特征的三步法提取*

周富强 王飞 张广军

(北京航空航天大学精密光机电一体化技术教育部重点实验室 北京 100083)

摘要: 提出一种三步法直线光条图像特征自动提取方法。计算光条各点的 HESSIAN 矩阵以确定其法线方向,在法线方向利用泰勒级数展开求得光条中心点的亚像素图像坐标,利用光条中心点的空间位置连续性约束,将相邻光条中心点连接成曲线。采用直线近似方法将曲线拆分为独立直线。将位于不同独立直线上的共线点进行融合,构成新的融合直线,通过融合直线长度约束和近似直线的角度约束,分割出单一直线光条的中心点,采用最小二乘直线拟合方法得到结构光直线光条的方程。通过对真实图像的试验,结果表明,提出的三步法直线光条提取方法,能够自动提取出复杂背景中的直线光条,为线结构光视觉测量的现场应用奠定基础。

关键词: 结构光视觉 直线提取 光条 亚像素

中图分类号: TP391.41

Three-step Extraction Method for Line-stripe in Structured Light Vision

ZHOU Fuqiang WANG Fei ZHANG Guangjun

(Key Laboratory of Precision Opto-mechatronics Technology of Ministry of Education,
Beihang University, Beijing 100083)

Abstract: A three-step extraction method for the image feature of a light stripe in the structured light vision is proposed. The sub-pixel center of the light stripe can be obtained with Taylor series expansion in the normal direction which is determined by HESSIAN matrix. The curve can be linked with the sub-pixel center points of the light stripe subject to the continuity constraint in pixel position. The curve can be split into simple lines with line approximate method. The collinear center points on the different simple lines will be combined to one merged line. And then the equation of the line-stripe can be obtained by the least square line-fitting with the merged center points belong to the same merged line subject to the length constraint and angle constraint. The experiments conducted on some real structured-light vision images with complicated background reveal that the proposed three-step extraction method for line-stripe is characterized by high precision, automation and robustness. It advances the structured light vision to be applied widely on site.

Key words: Structured light vision Line extraction Light stripe Sub-pixel

0 前言

线结构光视觉测量具有大量程、非接触、速度快、系统柔性好和精度适中等优点,广泛应用于产品快速设计和加工质量控制、逆向工程以及自动控制等诸多领域^[1-4]。结构光视觉三维测量技术通过向被测对象投射相应模式的结构光,由摄像机拍摄变形光条图像,基于光学三角原理获取物体表面三维

信息,成为解决物体表面形貌测量、空间位置测量和三维运动信息获取等许多在线测量的有效途径。

线结构光传感器的模型参数的标定是线结构光视觉测量的关键和前提,现有的标定方法主要有基于立体靶标^[5]或者自由自动平面靶标^[6]两种方式,其中投射到立体靶标或者平面靶标上的直线光条图像特征的提取是结构光标定的重要环节。在线结构光视觉测量的工程应用中,往往需要现场在线标定,由于现场环境空间位置的限制以及光照的不确定性,获取的结构光光条图像表现为对比度不均匀、具有一定宽度的细长形状特征,同时图像中包

* 国家自然科学基金(50605002)和教育部新世纪优秀人才支持计划(NC ET-05-0194)资助项目。20071126 收到初稿,20080530 收到修改稿

含一些复杂的背景干扰图像特征, 现有的方法主要采用人工选取部分结构光条的感兴趣区域的处理方法, 从而使得操作复杂、效率低, 且难以充分利用图像中全部的有效结构光直线光条信息。因此, 研究线结构光直线光条图像特征的自动提取方法对于简化结构光标定的操作过程, 提高结构光视觉测量的现场应用的简便性, 进一步拓宽结构光视觉三维测量的工程应用具有重要的意义。

常见的光条中心线提取方法有灰度阈值法、极值法和梯度阈值法等, 这些方法实现简单, 但精度不高。贺俊吉等^[7]在光条截面上进行高斯或抛物线拟合, 再通过求其极值点来得到光条纹中心的亚像素位置, 该方法只适合于图像中法线方向变化不大的直线光条纹。STEGER^[8]利用 HESSIAN 矩阵得到图像中的道路和血管等类似条纹的法线方向, 然后求法线方向上的极值点得到条纹中心线的亚像素位置。STEGER 方法具有精度高, 鲁棒性好等优点, 广泛应用于航拍图像和医学图像的自动分割。

在 STEGER 算法的基础上, 本文提出了一种三步法线结构光直线光条图像特征自动提取方法。由光条各点的 HESSIAN 矩阵确定其法线方向, 在法线方向利用泰勒级数展开求得直线光条中心点的亚像素图像坐标, 将相邻光条中心点连接成曲线; 然后对曲线所有中心点进行直线近似, 拆分为由共线点构成的独立直线; 最后, 对属于不同直线结构的共线中心点进行融合, 构成新的融合直线, 通过融合直线长度和角度约束, 获得表征结构光光条的有效直线, 采用最小二乘直线拟合方法得到结构光直线光条的方程。三步法直线光条提取方法利用了光条中心点的空间位置连续性约束, 用直线近似和共线点融合, 实现了线结构光直线光条的自动鲁棒性提取。

1 线结构直线光条截面的数学模型

如图 1 所示, 二维图像中的直线光条在垂直于光条的法线方向的截面轮廓表现为一维曲线特征, 用 $s(t)$ 表示这一曲线, $n(t)$ 表示光条的法线方向。理想的光条一般具有一定宽度, 在法线方向上, 轮廓表现为对称的条状特征。但真实光条的两侧过渡区域内灰度变化并不是阶跃变化, 而是表现为平滑过渡的缓慢变化特征, 因此更适合用抛物线模型来描述光条的灰度轮廓。

$$s(t) = \begin{cases} h(1 - (t/b)^2) & |t| \leq b \\ 0 & |t| > b \end{cases} \quad (1)$$

式中 t —— $n(t)$ 方向上偏离中心点的距离

b ——光条宽度

h ——光条灰度值

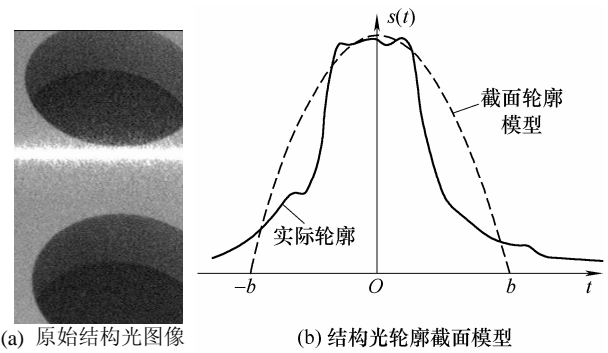


图 1 光条纹截面模型

根据式(1)表示的结构光条纹轮廓模型, 光条中心的图像坐标提取的关键是获得光条法线方向, 然后在法线方向获得轮廓对称中心 O 的图像坐标。

2 线结构直线光条的提取

2.1 直线光条中心图像坐标的提取及连接

根据式(1)表示的光条截面法线方向的轮廓模型, 将光条理解为有一定宽度的线条, 利用 STEGER 算法实现直线光条中心点的高精度自动提取。利用大模板高斯卷积计算光条上各点的 HESSIAN 矩阵, 由此确定各点的法线方向, 然后在法线方向求得光条中心的亚像素图像坐标。

设 $f(x, y)$ 为二维图像, $g(x, y)$ 为二维高斯函数, r_x 、 r_y 、 r_{xx} 、 r_{xy} 和 r_{yy} 分别为图像与下列高斯核卷积结果

$$\begin{cases} g_{x,\sigma}(x, y) = g'_\sigma(x)g_\sigma(y) \\ g_{y,\sigma}(x, y) = g_\sigma(x)g'_\sigma(y) \\ g_{xx,\sigma}(x, y) = g''_\sigma(x)g_\sigma(y) \\ g_{xy,\sigma}(x, y) = g'_\sigma(x)g'_\sigma(y) \\ g_{yy,\sigma}(x, y) = g_\sigma(x)g''_\sigma(y) \end{cases}$$

则光条上任意一点的 HESSIAN 矩阵为^[8]

$$\mathbf{H}(x, y) = \begin{pmatrix} r_{xx} & r_{xy} \\ r_{xy} & r_{yy} \end{pmatrix} \quad (2)$$

HESSIAN 矩阵最大特征值对应的特征矢量对应于光条法线方向, 用 (n_x, n_y) 表示。以点 (x_0, y_0) 为基准点, 则光条图像特征的亚像素坐标为^[8]

$$(p_x, p_y) = (x_0 + tn_x, y_0 + tn_y) \quad (3)$$

式中 $t = -\frac{n_x r_x + n_y r_y}{n_x^2 r_{xx} + 2n_x n_y r_{xy} + n_y^2 r_{yy}}$

若 $(tn_x, tn_y) \in [-1/2, 1/2] \times [-1/2, 1/2]$, 即一阶导数为零的点位于当前像素内, 且 (n_x, n_y) 方向的二阶导数大于指定的阈值, 则该点 (x_0, y_0) 为光条中心点。

对每个像素, 由前面叙述的方法可以得出三个要素: ① 图像光条的法线方向。② 图像光条中心点二阶偏导数。③ 图像光条中心点的亚像素坐标。则光条中心点的连接方法是: 由具有最大二阶导数的像素开始, 添加适当的邻域点使之成为曲线。由于起始点可能位于曲线的中部, 所以应沿法线的正反两个方向上进行添加。只有与当前曲线方向相容的三个邻域像素会被考虑。比如, 当前像素为 $[i, j]$, 且当前线条方向介于 $[-22.5^\circ, 22.5^\circ]$, 则只有像素 $[i+1, j-1]$ 、 $[i+1, j]$ 和 $[i+1, j+1]$ 被考虑。

经过连接后的结构光条中心点为多个相邻的二维坐标点构成的序列, 空间位置相邻的中心点序列构成了一条曲线。假定一条曲线上的中心点最小数量为 T_L (一般可取 $T_L > 20$), 只保留比 T_L 长的曲线, 用 $L_{ci} (i=1, \dots, M_c)$ 表示, M_c 为曲线的数量, 其中第 i 条曲线上的点用 $p_{cj}^i(x, y) (j=1, \dots, N_{ci})$ 表示, N_{ci} 为点的数量。 $p_{cj}^i(x, y)$ 可能为同一曲线上的中心点, 也可能为相邻两条曲线上的中心点, 还可能包含属于背景的干扰点。线结构标定特征是指属于同一直线光条上的中心点, 因此, 需要对 L_{ci} 进行有效分割, 使得分割后的坐标序列属于同一直线光条。

2.2 曲线的拆分

将一条包含多个光条中心点的曲线 L_{ci} 进行拆分, 以便得到由近似共线中心点构成的独立直线。曲线拆分的主要算法如下。

(1) 采用类似 Douglas-Peucker 轮廓直线简化算法^[9](简称 DP 算法), 对提取出的曲线结构在顶点出进行拆分, 基本计算过程如下。

给定顶点数组 \mathbf{V} , 调用 $\text{DP}(\mathbf{V}, m, n)$ 算法简化从 v_m 到 v_n 的子链码。 $\text{DP}(\mathbf{V}, m, n)$ 算法如下。

1) 搜索距离直线 $L_{v_m v_n}$ 最远的曲线上的点作为顶点 v_f , 距离为 d 。

2) 如果 $d > \varepsilon$ (ε 为距离误差), 则:

3) $\text{DP}(\mathbf{V}, m, n)$, 在 v_f 处将曲线分开, 对 $L_{v_m v_f}$ 进行递归处理。

否则

4) $\text{DP}(\mathbf{V}, m, n)$, 对 $L_{v_f v_n}$ 进行递归处理。

否则

5) 使用 $L_{v_m v_n}$ 作为独立直线。

(2) 消除点数小于 T_L 的拆分后的独立直线, 保留的独立直线用 $L_{si} (i=1, \dots, M_s)$ 表示, M_s 为独立直线的数量, 相应中心点用 $p_{sj}^i(x, y) (j=1, \dots, N_{si})$ 表示。

如图 2 所示, $v_1 v_2$ 由提取出的光条中心点构成的一条曲线, 按照前面的算法, 到直线 $L_{v_1 v_2}$ 的最大

距离在点 v_3 处, 且超过距离误差, 因此在点 v_3 处将曲线 $v_1 v_2$ 拆分为两条独立直线 $L_{v_1 v_3}$ 和 $L_{v_3 v_2}$, 根据算法原理和定义的距离误差 $L_{v_1 v_3}$ 和 $L_{v_3 v_2}$ 不可再分, 表示了 2 条独立的近似直线。

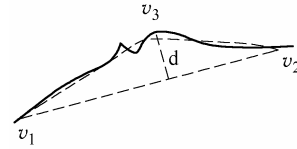


图 2 曲线拆分示意图

2.3 共线中心点的融合

第 2.2 节的算法将曲线拆分为近似独立直线, 这些独立直线包含的中心点可能属于同一直线, 因此需要进行共线点的融合。融合的主要算法如下。

(1) 利用由第 2.2 节得到的 $L_{si} (i=1, \dots, M_s)$ 包含的点 $p_{sj}^i(x, y) (j=1, \dots, N_{si})$, 采用最小二乘方法分别拟合直线, 得到 M_s 条独立直线的近似参数。

设拟合直线上点为 $\mathbf{x}_p = (x_p \ y_p)^T$, 方向余弦为 $\boldsymbol{\alpha}_p = (\alpha_{xp} \ \alpha_{yp})^T$, 则拟合直线的优化目标函数为^[10]

$$J(\mathbf{x}_p, \boldsymbol{\alpha}_p) = \min \sum \left| \boldsymbol{\alpha}_p \times (\mathbf{x}_p - p_{sj}^i(x, y)) \right|^2 \quad (4)$$

设系数矩阵

$$\mathbf{A} = \begin{pmatrix} p_{s1}^i(x) & p_{s1}^i(y) \\ \vdots & \vdots \\ p_{sj}^i(x) & p_{sj}^i(y) \end{pmatrix}$$

最小化式(4), 便可以得到拟合直线的方向余弦, 其解为 \mathbf{A} 的最大特征值对应的特征矢量。

由拟合直线的方向余弦, 计算得到直线相对于水平轴的角度, 用 β_{si} 表示第 i 条独立直线对应的角度。计算图像坐标系原点到拟合直线的垂直距离, 用 d_{si} 表示原点到第 i 条拟合直线的垂直距离。

(2) 利用拟合直线的角度约束和原点到拟合直线之间的距离约束, 融合拆分后的独立直线包含的中心点。对于拆分后的任意两条直线 L_{si} 和 L_{sk} , 计算①角度差 $\Delta\beta_{s(i, k)} = |\beta_{si} - \beta_{sk}| \leq T_\beta$ (T_β 为指定的角度差阈值, 精度要求越高, 取值就越小)。②距离差 $\Delta d_{s(i, k)} = |d_{si} - d_{sk}| \leq T_d$ (T_d 为指定的距离差, 单位为像素, 精度要求越高, 取值就越小)。

如果 L_{si} 和 L_{sk} 同时满足以上两个条件, 则将 L_{si} 和 L_{sk} 融合为一个新的直线, 称为融合直线, 删除已经融合过的独立直线, 对所有的直线融合后, 再次对融合后的直线进行同样的过程, 直到没有再满足融合条件的直线, 则融合停止。融合后的直线用 $L_{mi} (i=1, \dots, M_m)$ 表示, M_m 为融合直线的数量, 相应直线上的点用 $p_{mj}^i(x, y), j=1, \dots, N_{mi}$ 。

如图 3 所示,按照以上共线光条中心点融合算法,图 3 中的直线 L_{s1} 和 L_{s2} 同时满足融合的两个条件,因此两条直线包含的中心点序列融合为一条新的直线 L_{m1} ,而 L_{s3} 和 L_{m1} 不满足条件 2, L_{s4} 和 L_{m1} 不满足条件 1, L_{s3} 和 L_{s4} 都不满足条件 1 和 2,因此都不能进行融合。最终经过融合后,图像中包含 L_{m1} 、 L_{s3} 和 L_{s4} 三条直线。

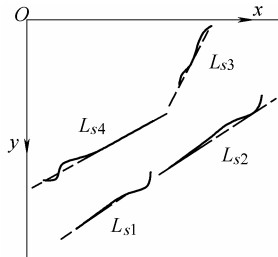


图 3 共线中心点的融合示意图

(3) 利用 L_{mi} ($i=1, \dots, M_m$) 上包含的点 $p_{mj}^i(x, y)$ ($j=1, \dots, N_{mi}$), 采用步骤(1)中的方法, 拟合得到直线光条的方程。

3 试验验证

为了验证直线光条三步法提取的可行性, 按照前面所叙述的步骤, 以线结构光视觉传感器参数标定中的直线光条为例, 进行了真实试验验证。由线结构光投射器投出的平面结构光, 与标定靶标平面相交, 形成直线光条, 由于靶标平面包含其他物理特征, 如圆孔、黑白方块等, 由摄像机拍摄的结构光条图像, 其特征表现复杂背景中的非完整直线光条。试验结果如图 4 所示, 其中图 4a 为原始图像; 图 4b 为采用 STEGER 算法提取出的结构光中心点, 并经连接成曲线, 可以看出, 除了包含结构光条的中心点外, 还包含了复杂背景中的干扰特征; 图 4c 为利用曲线长度约束(组成线结构的中心点数量), 消除较短的结构(此处长度阈值取 90 点), 相比于图 4b, 大部分短的曲线已经消除; 图 4d 为拆分为近似直线并满足长度约束的直线光条; 图 4e 为满足角度约束的直线光条, 可以看出大部分干扰特征已经消除; 图 4f 为满足 2 个融合条件, 经融合后的直线光条, 同时融合后的直线光条应该满足长度约束(此处的线条至少由一条或一条以上的多个直线光条组成, 因此长度约束可以取得较大一些, 以便减少出现多个直线光条的可能性, 此处融合光条的长度阈值取 200 点), 不同直线光条的首尾相连, 可以看出, 自动提取出了图 4a 中的直线光条特征。拟合得到的直线光条方程为

$$\begin{cases} x = 168.847 + 0.1379t \\ y = 278.922 + 0.9904t \end{cases}$$

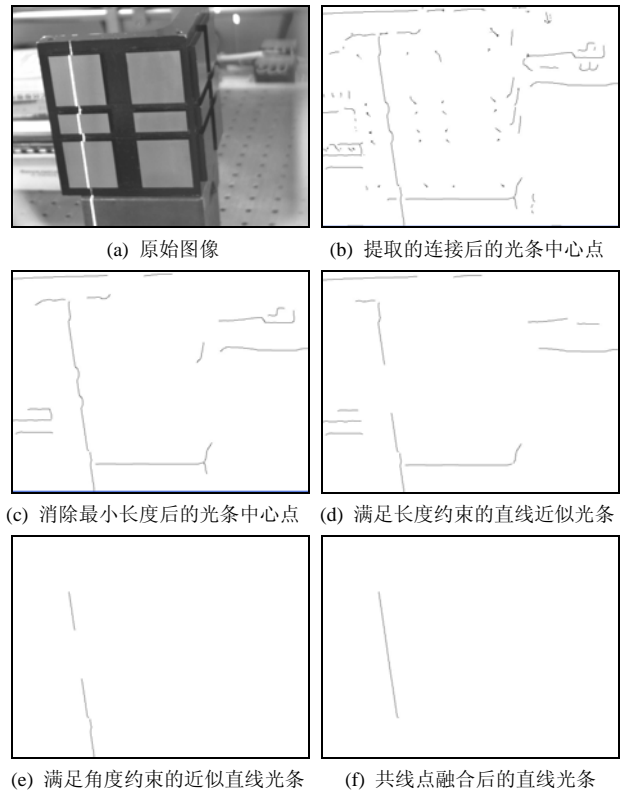


图 4 结构光直线光条的自动提取试验结果

为了验证直线光条三步法提取的鲁棒性, 对双直线光条和十字直线光条的图像进行试验, 双直线光条的试验结果如图 5 所示, 十字直线光条的试验结果如图 6 所示, 从试验结果可以看出, 直线光条三步法提取能够自动提取出复杂背景中的直线光条图像特征, 同时消除了杂散光条特征的影响。同现有的依赖人工选定直线光条的感兴趣区域的光条提取方法相比, 本文的方法具有自动化程度高、操作简便, 同时能够充分利用有效光条信息, 为提高结构光视觉传感器标定精度奠定基础。

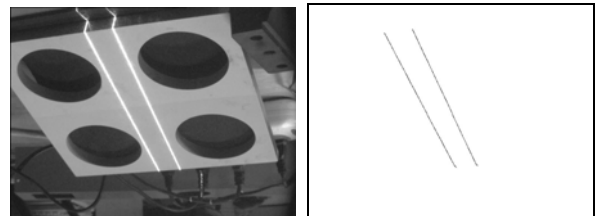


图 5 双直线光条的自动提取试验结果

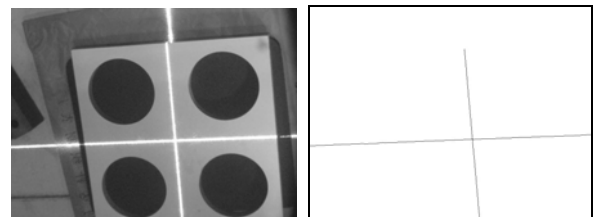


图 6 十字结构光直线光条自动提取试验结果

4 结论

(1) 计算光条各点的 HESSIAN 矩阵确定其法线方向, 在法线方向利用泰勒级数展开求得直线光条中心的亚像素图像坐标, 将相邻光条中心点连接成曲线。

(2) 对曲线上的中心点进行直线近似, 拆分为独立的直线。

(3) 对共线中心点进行融合, 构成新的直线, 通过长度和角度约束, 获得有效的光条直线对应的中心点, 采用最小二乘直线拟合方法得到结构光直线光条的方程。所提出的三步法直线光条提取方法利用了光条中心点的空间位置连续性约束, 用直线近似和共线中心点的融合, 实现了线结构光直线光条的自动鲁棒性提取。通过对真实线结构光图像进行试验, 结果表明, 所提出的方法能够自动提取出复杂背景中的直线光条图像特征, 取得了好的效果。

参 考 文 献

- [1] YANG C S, CURTIS P, PAYEUR P. Calibration of an integrated robotic multimodal range scanner[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2006, 55(4): 1 148-1 159.
- [2] DEMEYERE M, RURIMUNZU D, EUGENE C. Diameter measurement of spherical objects by laser triangulation in an ambulatory context[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2007, 56(3): 867-872.
- [3] FOREST J. New methods for triangulation-based shaped acquisition using laser scanners[D]. Spain: University of Girona, 2004.
- [4] LAVOIE P, IONESCU D, PETRIU E M. 3-D object model recovery from 2-D Images using structured light[J]. IEEE Transaction on Instrumentation and Measurement, 2004, 53(2): 437-442.
- [5] HUYNH D Q, OWENS R A, HARTMAN P E. Calibrating a structured light stripe system: a novel approach[J]. International Journal of Computer Vision, 1999, 33(1): 73-86.
- [6] ZHOU F, ZHANG G. Complete calibration of a structured light stripe vision sensor through planar target of unknown orientations[J]. Image and Vision Computing, 2005, 23(1): 59-67.
- [7] 贺俊吉, 张广军. 结构光三维视觉检测中光条图像处理方法研究[J]. 北京航空航天大学学报, 2003, 29(7): 593-597.
HE Junji, ZHANG Guangjun. Study on method for processing image of strip in structured-light 3D vision measuring technique[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2003, 29(7): 593-597.
- [8] STEGER C. An unbiased detector of curvilinear structures[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and machine Intelligence, 1998, 20(2): 113-125.
- [9] HERSHBERGER J, SNOEYINK J. Speeding up the Douglas-Peucker line simplification algorithm[C]// Proceedings of the 5th International Symposium on Spatial Data Handling (Charleston, SC, Aug. 3-7), 1992: 134-143.
- [10] SHAKARJI C M. Least-squares fitting algorithms of the NIST algorithm testing system [J]. Journal of Research of the National Institute of Standards and Technology, 1998, 103(6): 633-641.

作者简介: 周富强, 男, 1972年出生, 教授, 博士研究生导师。主要从事计算机视觉、图像处理与识别, 激光及光电测试技术研究。发表论文40余篇, 获国家级奖励2项, 部级奖励1项, 获得发明专利5项。
E-mail: zfq@buaa.edu.cn