

脊点集稳健裁剪和惩罚约束的高精度靶标点提取

杨 晟, 李学军, 谢剑薇, 王 珏

(中国人民解放军装备学院, 北京 101416)

摘要: 高精度快速靶标点的自动提取是相机标定、立体解算、视觉导航等关键领域的基础。定位精度和算法稳健性为难点之所在, 采用重心约束法检测初始交点后, 通过对称性约束探测直线附近的“脊点”点集, 然后采用最小二乘线性拟合初值并迭代滤掉粗差, 再采用改进的 Hough 变换进一步求得交点的位置。然后采用惩罚函数在初始点附近步进调整, 精确确定靶标点的位置信息和方向。算法能够更强地适应噪声环境下、光照变化、图像旋转等影响, 达到小于 0.05 像素的定位精度。

关键词: 特征提取; 靶标提取; 靶标点定位; 脊点; Hough 变换

中图分类号: TP391 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-2276(2014)06-1994-06

Marking point extraction with high accuracy based on ridge points refining and punishment restriction

Yang Sheng, Li Xuejun, Xie Jianwei, Wang Jue

(Academy of Equipment, PLA, Beijing 101416, China)

Abstract: Automatic marking points extracting with high accuracy is basic for calibration, stereo calculation, visual navigation and other applications. The bottle-neck is the accuracy and robustness. Based on the rough point from the cross of lines of the neighbor barycenters in two directions, the ridge points were detected by the symmetric function and refined by an iterative least square method, based on the refined ridge points, the Hough transform was improved for determining the lines and their intersections. At last, the position of the marking points was to be adjusted by the penalty function with a changing step along the descent direction both in deflection and rotation separately. Our algorithm is robust to noisy, rotation, illumination variations and a certain degree of distortions, the accuracy could be less than 5 percents of a pixel.

Keywords: feature extracting; marking point extraction; point feature location; ridge point; Hough transform

收稿日期: 2013-10-10; 修订日期: 2013-11-25

基金项目: 武器装备预研项目(513150701); 国防预研基金(20060826)

作者简介: 杨晟(1985-), 男, 博士, 主要从事遥感图像处理、摄影测量、数字地球、软件设计与开发。Email: 1019_yangsheng@sina.com

0 引言

靶标点的自动识别和高精度定位是计算机视觉、目标识别、相机标定、相对定向中一个重要而基础的问题,自动识别的稳健性和定位精度仍然为许多场合下的瓶颈问题。

匹配领域的特征点提取算法,例如 Harris, DOG, SUSAN 等算子^[1],通常只能达到亚像素级的精度,并且存在很多伪特征和漏特征现象。数字相关法具有原理简单、适应性强和精度高等优点,但在对旋转目标中很少用到,此时模板选择难以实现^[2]。

圆心(椭圆圆心)拟合、形心法和灰度重心法是针对中心对称目标的亚像素算法,重心的特征拟合具有速度快的特点,但是对各向异性的灰度,例如光照、特征的不规则性非常敏感^[3],其定位精度可达 0.2~0.5 个像素^[2]。小面元拟合具有一定的通用性^[4-5],但一般很难获得很高的亚像素精度,通常只能达到 0.3 个像素。参考文献[6]介绍了 Zernike 矩、Hu 不变矩、Wavelet 矩,并利用它们定位特征点,然而统计窗口与形状的确定是个潜在的问题,计算量也很大。一些模型中较多的参数常带来解算结果的不稳定性和陷入局部极值。

数学模型拟合直线或曲线相交的方法,例如基于 Hough 变换的思想估计直线并求取交点的方法^[7-8],稳健性较好,广泛应用于图像中直线的检测、边缘提取等。然而,其计算量非常大,精度不高,并且投票式求交方法通常受到直线离散化的影响,在带有误差的直线上的点常产生变换域上多个极值,影响结果的准确性。参考文献[3]等利用棋盘网格的交点为一点、不易受透视变换和非线性畸变影响的特点,能提取 0.1 个像素级精度的交点。然而在实际过程中,棋盘格的颜色过渡为渐变的,并非有较明显的边界信息,这对下一步的精确定位提出挑战。

针对上述问题,文中在初始角点探测与提取基础上,设计了基于对称性约束脊点集最小二乘裁剪、稳健的 Hough 变换拟合直线求取交点、并通过惩罚函数步进调整靶标点位置和方向的高精度算法。并针对多种环境下的靶标点,在不同的噪声、光照等环境下进行了大量试验,并对实验结果进行了剖析和总结。

1 基于对称性约束脊点集最小二乘裁剪解算

首先,对图像进行反色、高斯平滑去噪和背景消除(或减小)。并利用靶标点附近亮度累积量较大和对称性较好等特点,检测图像中的靶标点的初始位置。利用极大值抑制探测候选点,然后通过其左右邻域重心的连线交点作为靶标点的初始位置。在特征的检测和获取过程中,需要多次解算邻域的灰度质心、灰度统计量和一阶统计量,图像的迭代积分^[9]可以加快处理的速度。在此基础上,探测脊点,并用最小二乘拟合直线参数并裁剪。

1.1 脊点集的求取

在初始点邻域搜索方向上对称性较好的点,即定义为“脊点”,它们形成的集合称为“脊点集”。定义约束函数:

$$\begin{cases} F_x(x,y) = \sum_{i=1}^r |w_r(i,0)| \cdot [I(x+1,y) - I(x-1,y)]^2 \\ F_y(x,y) = \sum_{j=1}^r |w_r(0,j)| \cdot [I(x,y+j) - I(x,y-j)]^2 \end{cases} \quad (1)$$

如图 1 所示, L_h 表示 $\vec{P}_{L_c \rightarrow R_c}$ 方向, L_v 代表 $\vec{P}_{D_c \rightarrow U_c}$ 方向, $F_x(x,y)$ 表示 L_h 方向的搜索, $F_y(x,y)$ 表示 L_v 方向的搜索, $w_r(\cdot)$ 选择惯量矩或一阶矩作为加权窗口。在参考的 $\vec{P}_{L_c \rightarrow R_c}$ 或 $\vec{P}_{D_c \rightarrow U_c}$ 方向上对称性最好的点,对应于其局部最小值点,并通过二次抛物线拟合极值点位置。

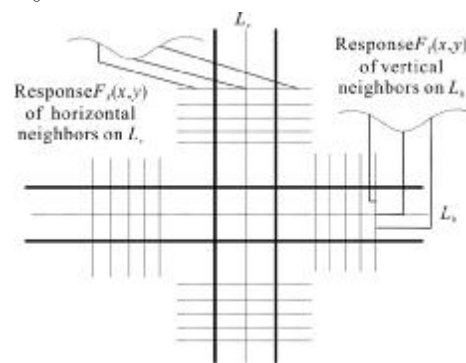


图 1 两个方向上脊点探测示意图

Fig.1 Detection of ridge points in two directions

从而筛选出近似中心线上的两个点集 S_x 和 S_y 。

$$\begin{cases} S_x \{ (x_k, y_k) | (x_k, y_k) \in \min_{y=-r}^r [F_x(x,y), x=x_k] \} \\ S_y \{ (x_k, y_k) | (x_k, y_k) \in \min_{x=-r}^r [F_y(x,y), y=y_k] \} \end{cases} \quad (2)$$

其中, r 表示处理邻域半径。对于“+”点, 靶标的旋转对上述函数的判断没有影响。

对于棋盘方格式的靶标影像, 可利用中心对称性, 并沿分界线对称性最不好的点集作为脊点集, 即对应上述评价函数的行或列方向上的极大值点集。

1.2 脊点集的最小二乘裁剪

上述脊点集对应两条直线: 一方面, 接近水平或垂直的直线具有非常小的斜率或非常大的斜率, 对系数的解算很不利, 于是在拟合前进行初始判断, 如果相交直线接近于水平或垂直, 将点集的坐标整体旋转 45° (最后解算完参数再逆向旋转 45°); 另一方面, 对于高分辨率影像, 像素坐标的高度或宽度通常达到近万 (或超过), 例如在点 (38, 9 420) 附近拟合直线, 相当于给 Y 坐标一个较大的权重, 这对实际处理是不利的, 所以把点集的坐标中心化, 然后将中心搬移到一个非零点邻域内 (一些在原点扰动的点将较大影响估计的精度)。

对于 N 个点所对应的直线: $Ax_i + By_i - 1 = 0, i = 0, 1, 2, \dots, N-1$, 定义误差函数:

$$E(A, B) = \sum_{i=0}^{N-1} (Ax_i + By_i - 1)^2 \quad (3)$$

易知使得 $E(A, B)$ 最小时的 A, B 满足: $\partial E(A, B) / \partial A = \partial E(A, B) / \partial B = 0$, 即:

$$\begin{cases} A \sum_{i=0}^{N-1} x_i^2 + B \sum_{i=0}^{N-1} x_i y_i - \sum_{i=0}^{N-1} x_i = 0 \\ A \sum_{i=0}^{N-1} x_i y_i + B \sum_{i=0}^{N-1} y_i^2 - \sum_{i=0}^{N-1} y_i = 0 \end{cases} \quad (4)$$

可知:

$$\begin{cases} A = (\sum_{i=0}^{N-1} x_i \sum_{i=0}^{N-1} y_i^2 - \sum_{i=0}^{N-1} y_i \sum_{i=0}^{N-1} x_i y_i) / C \\ B = (\sum_{i=0}^{N-1} x_i^2 \sum_{i=0}^{N-1} y_i - \sum_{i=0}^{N-1} x_i \sum_{i=0}^{N-1} x_i y_i) / C \\ C = \sum_{i=0}^{N-1} x_i^2 \sum_{i=0}^{N-1} y_i^2 - (\sum_{i=0}^{N-1} x_i y_i)^2 \end{cases} \quad (5)$$

通过上述方法可估算直线的初始参数, 当偏移大于 3 倍平均偏移时, 放弃该点。然后, 采用迭代最小二乘法裁剪法^[6]估计直线, 并不断排除较大偏离的点。

2 基于探测脊点的 Hough 变换求交点

2.1 Hough 变换与步长的设置

Hough 变换的思想 (Paul Hough, 1962) 是将直线

进行坐标变换 $s = x \cos \theta + y \sin \theta$, 这样每个点 (x_i, y_i) 对应变换空间的 (s, θ) 所对应的正弦曲线, 然后求曲线的交点即可确定直线的参数。由于此时的关系方程并非线性, 常采用投票的方法检测极值点, 参考文献 [7-8] 等进行了一些改进和比较。问题的焦点是交点的准确确定上, 大量试验表明, 计算机处理中需要将角度 θ 离散化, 例如从 $0^\circ \sim 180^\circ$, 步长为 1° , 此时, 响应函数 ρ 在角度 θ 的响应下出现更显著的离散效果, 导致曲线的描述非连续化 (容易形成很离散的点集, 或者变化缓慢成“直方图”状)。直接影响传统投票法的可靠性和准确性。

因此, 首先解算点集对应的离散空间的值域, 设定 ρ 的步长, 并根据 ρ 的步长反算需要设定的 θ 的步长, 如果出现不连续时, 动态缩小 θ 步长补充空缺的 ρ 值, 使得 $\theta-\rho$ 曲线接近离散空间的连续。并根据拟合曲线的形状进行增强和模糊处理, 使 $\theta-\rho$ 曲线趋于连续化。图 2 为近似共线三点对应的 $\theta-\rho$ 曲线 (垂直方向代表规格化后 θ , 水平方向代表 ρ 在规格化后 θ 下的规格化响应值) 在交点处的放大图, 左右部分分别表示处理前后效果。

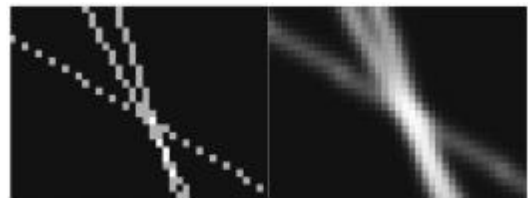


图 2 某近似共线 3 点 Hough 变换对应曲线交点处的放大效果

Fig.2 Amplified intersection of curves from three near co-linear points' Hough transform

2.2 平移和比例变化对 Hough 变换求交点的影响

对于 (x_0, y_0) 和 (x_1, y_1) 两点的 Hough 变换,

$$\begin{cases} \rho = (x_0) \cos(\theta) + (y_0) \sin(\theta) \\ \rho = (x_1) \cos(\theta) + (y_1) \sin(\theta) \end{cases} \quad (6)$$

于是有

$$\theta_0 = \arctan[-(x_0 - x_1) / (y_0 - y_1)] \quad (7)$$

θ_0 的象限与 $(y_0 - y_1, -x_0 + x_1)$ 一致。对应地,

$$\rho_0 = (x_0) \cos(\theta_0) + (y_0) \sin(\theta_0) \quad (8)$$

对于平移变换后的 (x'_0, y'_0) 和 (x'_1, y'_1) , 即:

$$(x', y') = (x, y) + (\Delta x, \Delta y) \quad (9)$$

若其 Hough 变换后的参数为 θ'_0 和 ρ'_0 , 可知,

$$\theta'_0 = \arctan\left(-\frac{x'_0 - x'_1}{y'_0 - y'_1}\right) = \arctan\left(-\frac{x_0 - x_1}{y_0 - y_1}\right) = \theta_0 \quad (10)$$

$$\rho'_0 = \rho_0 + (\Delta x)\cos(\theta_0) + (\Delta y)\sin(\theta_0) \quad (11)$$

对于 X 和 Y 方向上的等比例伸缩变换时, $\theta'_0 = \theta_0, \rho'_0 = t\rho_0$ 。对于任意比例变化, 类似的推导方法。

当参与描述的点较多时, 采用最小二乘平差思想估算最优参数值。

2.3 可逆变换下 Hough 变换两直线求交点

对于 X-Y 下任意可逆变换 A(), 其逆变换为 A⁻¹()。其 Hough 变换满足:

$$\begin{cases} \rho_x = A_x(x, y)\cos(\theta_x) + A_y(x, y)\sin(\theta_x) \\ \rho_y = A_x(x, y)\cos(\theta_y) + A_y(x, y)\sin(\theta_y) \end{cases} \quad (12)$$

不难证明其交点的坐标满足:

$$\begin{aligned} (x, y) = A_{(x, y)}^{-1} \{ & [\rho_y \sin(\theta_x) - \rho_x \sin(\theta_y)] / [\sin(\theta_x - \theta_y)], \\ & [\rho_x \cos(\theta_y) - \rho_y \cos(\theta_x)] / [\sin(\theta_x - \theta_y)] \} \quad (13) \end{aligned}$$

当 A() 响应为单位矩阵响应时, A⁻¹() = A() = E, 相当于仍然在 X-Y 下的处理空间中。

在裁剪脊点集中利用 Hough 变换求取直线的交点, 一方面可以减少异常点对 Hough 变换的影响, 从而提高定位精度和稳健性; 另一方面大幅度减少传统 Hough 变换所需的计算量。

3 基于惩罚函数的靶标点步进精定位

局部极值问题使得算法在一些情形下陷入局部最优解, Hough 变换对于直线的拟合具有很好的稳健性, 然而其描述参数为拟合解, 误差 ρ 与 θ 和的步长、以及 θ - ρ 域极值点的定位精度相关。因此, 采用对称性约束的步进微调算法将保证足够的精度。经过前文的处理, 靶标点的位置可以确定在约 0.5 个像素范围内(稍大误差不影响算法)。于是, 在靶标点初始位置半径为 r 个像素的邻域内, 以 step 为步长, 按照如下惩罚函数, 计算响应值,

$$F_{xy}(i, j) = \sum_{v=0}^r \sum_{u=-r}^r w_r(i, j) \cdot [I(x_0 + i \cdot \text{step} + u, y_0 + j \cdot \text{step} + v) - I(x_0 + i \cdot \text{step} - u, y_0 + j \cdot \text{step} - v)]^2 \quad (14)$$

$w_r(i, j)$ 为加权函数, 可为一阶矩、二阶矩或高斯窗。 $I(x + i \cdot \text{step}, y + j \cdot \text{step})$ 的值由二维 Sinc 函数插值得到。由于靶标具有中心对称性, 所以此惩罚函数能够适应角度的旋转。

然后将函数响应值进行统一化, 搜索局部极值,

并利用二次极值拟合条件拟合最小值点的位置。

$$\begin{cases} x'_0 = x_0 - \frac{\partial F_{xy}(x_0, y_0)}{\partial x} / \left[\frac{\partial^2 F_{xy}(x_0, y_0)}{\partial x^2} \right] \\ y'_0 = y_0 - \frac{\partial F_{xy}(x_0, y_0)}{\partial y} / \left[\frac{\partial^2 F_{xy}(x_0, y_0)}{\partial y^2} \right] \end{cases} \quad (15)$$

得到新的坐标。然后以参考点为中心, 利用靶标的对称性, 采用针对旋转角度的惩罚函数确定靶标点的方向。

$$\begin{aligned} F_\theta(k) = & \sum_{j=0}^r \sum_{i=-r}^r w_r(i, j) \cdot \{ I[x_0 + FX(i, j, k), y_0 + FY(i, j, k)] - \\ & I[x_0 + FX(i, j, k), y_0 - FY(i, j, k)] \}^2 + \\ & \sum_{j=-r}^r \sum_{i=0}^r w_r(i, j) \cdot \{ I[x_0 + FX(i, j, k), y_0 + FY(i, j, k)] - \\ & I[x_0 - FX(i, j, k), y_0 + FY(i, j, k)] \}^2 \\ FX(x, y, k) = & x \cos(k \cdot \text{step}_\theta) - y \sin(k \cdot \text{step}_\theta) \\ FY(x, y, k) = & x \sin(k \cdot \text{step}_\theta) + y \cos(k \cdot \text{step}_\theta) \end{aligned} \quad (16)$$

step_θ 为角度调整步长。当靶标点的响应函数达到最小(或接近 0 时), 靶标点正好转到正直方向, 即“+”平行于两坐标轴。实现过程中, 以第 2 节中直线拟合的初始角度为基础, 采用变步长, 先用较大步长锁定初始角度, 然后用小步长精确搜索, 从而精确确定靶标点的方向信息。

为了提高算法速度, 一方面可采用并行化设计多线程运行程序; 另一方面可以采用梯度下降法邻域搜索探测极大值(以少量靶标点陷入局部极值为代价)。

4 试验与分析

测试图片的生成与基准点位置的确定: 假设线宽 W_L , 方格的宽度为 W_B 。对应的, 第 M 行第 N 列的网格交点即“+”中心点 P(M, N) 的坐标为:

$$\begin{cases} P(M, N).x = M \cdot W_B + W_L / 2 \\ P(M, N).y = N \cdot W_B + W_L / 2 \end{cases} \quad (17)$$

然后进行旋转、加入噪声、反色等变换。噪声为随机分布的高斯白噪声, 设其规格化后的值域为 $[-1, 1]$, 转化为噪声所占的比例 N_G , 即对应于 $[-N_G, N_G]$ 。为保证图像变换的精度, 插值采用三次近似 SINC 曲面插值。

对于旋转变换, 对应网格点的真值为:

$$\begin{cases}
 P'(M,N) \cdot x = \cos\theta[P(M,N)] \cdot x - W/2 + \\
 \quad \sin\theta[P(M,N)] \cdot y - H/2 + W/2 \\
 P'(M,N) \cdot y = -\sin\theta[P(M,N)] \cdot x - W/2 + \\
 \quad \cos\theta[P(M,N)] \cdot y - H/2 + H/2
 \end{cases} \quad (18)$$

式中: W 和 H 分别表示影像的宽和高。试验中, W_L 为 3 个像素, W_B 为 50 个像素。

该算法分别与几何中心法初始探测法、改进 Hough 变换直线求交算法 (简称改进 Hough 变换法)、最小二乘直线拟合与裁剪然后求交点算法 (简称最小二乘裁剪法)、对称性约束惩罚函数盲采样步进调整算法 (简称邻域盲采样优选法) 进行比较。图 3 为一组变换参数和不同噪声下对不同算法定位精度的影响。

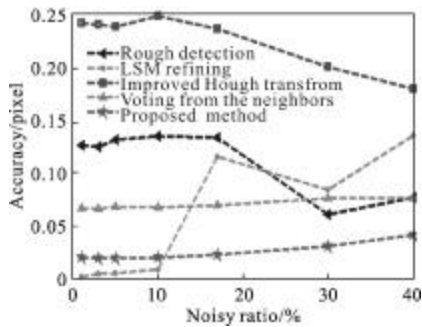


图 3 不同噪声比例对算法定位精度的影响
Fig.3 Affect of noisy for accuracy of different algorithms

当设定变化参数如表 1 所示。

表 1 实验环境下参数设置

Tab.1 Parameters of different group

	Group 1	Group 2	Group 3	Group 4	Group 5	Group 6
$\theta/(\circ)$	0.8	2.2	5.5	12	35	45
N_e	1	3.5	7.5	15	20	10

算法定位精度与其他算法的比较如图 4 所示。

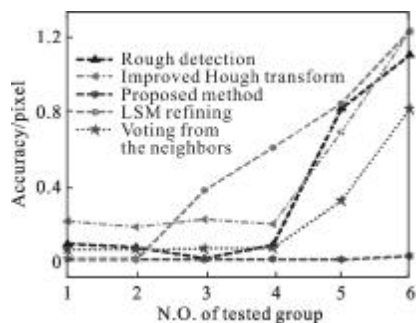


图 4 文中算法与一些经典算法的定位精度比较
Fig.4 Compare of accuracy between algorithm and others

文中算法位置定位精度在 0.02~0.05 之间, 角度可以定位到 0.01°。这 6 组实验的时间开销比较如图 5 所示。

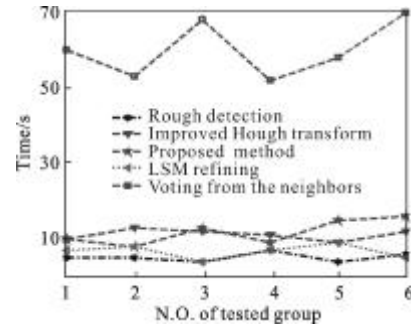


图 5 文中算法与一些经典算法时间开销对比表
Fig.5 Compare of time cost among algorithms

就定位精度而言, 文中算法的定位精度最高, 能达到小于 0.05 像素的误差, 邻域盲采样优选法在本文思想的约束和合适的步长下, 能够达到近似的精度, 但是以巨大的时间开销为代价, 步长的减小会出现较明显的假峰, 精度不会再明显提高。其他算法约在 0.1~0.3 像素。就抗噪性能而言, 噪声和量化误差会一定程度降低定位精度, 邻域盲采样优选法和改进 Hough 变换法稳健性相对较好, 最小二乘裁剪法容易受到一些异常解的影响, 文中算法融合了 Hough 变换和最小二乘裁剪法的优势, 相同噪声环境下, 具有最好的稳定性。从时间开销上讲, 本文算法与改进 Hough 变换法 (直线附近点的拟合法, 如果对于图像局部进行整体 Hough 变换, 时间开销会较大) 和最小二乘裁剪法相当, 而远小于邻域盲采样优选法。

采用多种对称靶标和多种环境下的靶标点进行试验, 部分靶标点 (分别来自不同尺寸的靶标纸、液晶屏靶标、实验靶标、靶标点等) 的部分如图 6 所示。

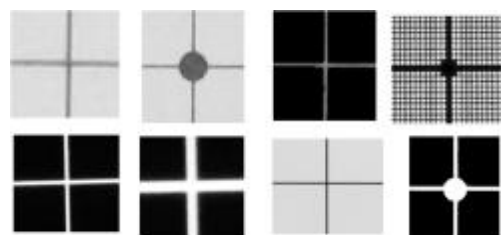


图 6 该算法进行处理的系列靶标点
Fig.6 Kinds of marking points while extracting by algorithm

对于上述的靶标点影像, 文中算法均能取得理

想的效果,稳健性强,识别准确,定位精度高。类似参考文献[10]的评定指标,文中算法的重复定位误差小于 10^{-5} 像素,稳健性和定位精度远大于其的像素量级的水平,角度的重复定位误差在 10^{-2} 度量级。

5 结 论

在几何中心靶标点探测的基础上,在初始点附近依据靶标的对称性探测对称性最好的脊点点集,然后利用脊点集的统计规律解算直线的初始参数,并用最小二乘裁剪和优选,然后在优选的点中通过改进的 Hough 变化拟合直线的参数并求交点。然后通过惩罚函数的约束,采用变步长探测法确定最优的靶标点位置。

比其他算法,该算法定位精度高,达到 0.05 像素的定位精度;稳健性强,能够有效适应图像的旋转、尺度变化、光照变化以及一定量的不对称噪声、透视变形等影响。算法具有一定通用性,通过对约束条件和惩罚函数的修改,可以适用于多种靶标提取的自动提取。

高精度、自动、稳健的靶标识别与定位可大幅度提高一些高精度量测场合的精度,节约量测成本,突破工艺上的瓶颈。可用于相机标定、视觉导航、飞行器精确制导等领域中。

参考文献:

- [1] Jing Li, Nigel M. A comprehensive review of current local features for computer vision [J]. *Neurocomputing*, 2008, 71: 1771-1787.
- [2] Shi Jingxin, Zhu Xiaofeng, Sun Minglei, et al. Method of straight edge detection with sub-pixel localization based on SUSAN and hough transform [J]. *Opto Electronic Engineering*, 2008, 35(6): 89-94. (in Chinese)
- [3] Lars Kruger, Christian Wohler. Accurate chequerboard corner localisation for camera calibration [J]. *Pattern Recognition Letters*, 2011, 32: 1428-1435.
- [4] Lucchese L, Mitra S. Using saddle points for subpixel feature detection in camera calibration targets [C]// *Asia - Pacific Conf. on Circuits and Systems*, 2002.
- [5] Cem Unsalan. A model based approach for pose estimation and rotation invariant object matching [J]. *Pattern Recognition Letters*, 2007, 28: 49-57.
- [6] Kong Fanzhi, Zhang Xingzhou, Wang Yizhong, et al. Fast matching location algorithm based on mixed moment for wire bonding[C]//*SPIE*, 2008, 7159: 71590F-1.
- [7] Chen Hongbo, Wang Qiang, Xu Xiaorong, et al. Line detection in traffic sign image based on improved Hough transform [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2009, 17 (5): 1111-1118. (in Chinese)
- [8] Zhu Yuanjuan, Guo Siyu, Zhu Zhijie, et al. Line detection algorithm combining LTS with Hough transform [J]. *Computer Engineering*, 2012, 38(14): 206-210. (in Chinese)
- [9] Pradip Mainali, Qiong Yang, Gauthier Lafruit, et al. Robust low complexity corner detector [J]. *Ieee Transactions on Circuits and Systems for Video Technology*, 2011, 21 (4): 435-445.
- [10] Yang Bowen, Zhang Liyan, Ye Nan, et al. Camera calibration technique of wide-area vision measurement [J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, 32(9): 159-167. (in Chinese)