

一种基于线空间的直线抽取算法研究

张祖勋¹ 吴 军¹ 张剑清¹

(1 武汉大学遥感信息工程学院, 武汉市珞喻路 129 号, 430079)

摘 要:以 LOG 算子为边缘检测手段, 对直线段特征的抽取过程进行了研究, 提出并实现了相关的算法, 给出了应用实例。

关键词:图像处理; 直线抽取; LOG 算子

中图法分类号: P231.5; TP751; P237.9; TP753

图像中的直线特征是视觉感知的重要线索和解释图像的基本依据。根据对检测出的边缘点采取连接策略的不同, 国内外学者提出了许多实用性的直线抽取算法, 如启发式连接、Hough 变换、相位编组和层次编组等^[1,2]。启发式连接要求在连接搜索前, 对边缘图作适当的内插或填充缝隙, 以避免使搜索过程很长; Hough 变换可避免由于噪声的存在以及直线间的缝隙对一般直线抽取过程所产生的影响, 但同时也增加了距离相隔较远的边缘点进行错误连接的概率; 相位编组尽管在对边缘局部决策之前考虑了边缘上下文关系, 但仍然难免存在受噪声影响大、丢失弱线和模糊线的问题; 层次编组很大程度上依赖于若干由人为设定先验规则的参数, 对图像的普适性不强。

作为边缘点的有序集合, 图像上的直线特征代表了一种不同于点的尺度空间, 在几何特性与灰度特性上更具有普遍性和稳定性。就整个直线抽取过程而言, 以直线特征所代表的边缘点空间作为研究对象, 并将边缘检测、编组连接两个阶段综合在一起加以考虑, 应能获得整体性能上的最优。基于以上想法, 顾及到边缘跟踪的过程, 本文以 LOG 算子为边缘检测手段, 对直线抽取过程进行了研究, 提出了基于线空间的直线抽取算法。

1 算法的基本思想

本质上, 边缘检测是一种基于“点”的运算, 一些直线抽取算法虽然在实施过程中考虑到了边缘

局部邻域的上下文关系, 但其基础仍然是单个边缘点的几何特性与灰度特性。图像上的直线段是边缘点的有序集合, 从统计学的观点看, 单个的边缘点与直线段之间是样本与样本空间的关系, 该样本集中的所有边缘点在图像的整体特性(几何、灰度)上定义了直线段在图像空间的结构。显然, 作为样本空间, 直线段在降低噪声干扰的整体性能方面将优于单个的边缘点。此外, 描述样本空间的统计量(几何、灰度)也为直线段的有效程度及在图像上的定位精度的判定提供了潜在的指标控制。基于上述认识, 描述和运用直线段作为样本空间的统计量来提取图像中的直线段成为本文的指导思想, 以此为出发点, 将整个直线抽取过程分为 3 个阶段。

1) 初始直线段的获取。该阶段包括边缘检测、边缘跟踪、链码分裂。在边缘检测过程中, 边缘标记阶段被忽略, 以维护边缘点的连续性, 从而可根据规则离散点信息场等值线的生成原理实施边缘跟踪; 在链码分裂过程中采用分裂合并算法^[3]时使用了较保守的阈值, 以控制直线段的几何位置误差在允许范围内。通过本阶段的处理, 边缘信息予以充分保留, 并尽可能保证初始直线段获取的可靠性, 为弱梯度直线特征的提取以及精确定位提供了可能。

2) 直线段的连接和合并。在对 1) 进行链码分裂时, 使用了较保守的阈值, 形成了许多较短的初始直线段。为了得到较理想的直线提取结果, 有必要对最终的短直线段进行编组连接以形成合

理的长直线段。

3) 直线段的评价和几何纠正。由于在1)中未进行边缘标记处理,一些“伪边缘点”被保留下来,导致形成的初始直线段中存在一定数量的“伪”直线特征。此外,由于采用LOG作为边缘检测算子,零交叉点的“漂移”问题也将导致直线段位置的偏移。本文采用LSTM^[4~6]方法对初始直线段进行评价和精确定位,在给定初始直线段的前提下,该方法能利用该直线段所在样本空间的统计特征量对其有效性作出判断,并对几何位置进行纠正。

2 算法的具体实施

2.1 初始直线段的获取

将边缘检测、编组连接两个步骤综合在一起加以考虑,初始直线段的获取又分为边缘等值线生成和边缘等值线分裂两个阶段。

2.1.1 边缘等值线生成

当将离散的图像灰度阵列看作连续灰度曲面时,则理想的边缘图将呈现出与等值线(或等高线)图相似的特性^[7,8]:① 相邻边缘点构成一条连续曲线(噪声使该连续曲线发生小的扰动,但仍保持其连续性);② 由相邻边缘点构成的连续曲线不止一条;③ 由相邻边缘点构成的连续曲线或者闭合于客观物体在图像上的投影边界,或者终止于图像的边界处;④ 由相邻边缘点构成的连续曲线不相互交错。

显然,以上边缘图所表现出的空间连续和闭合特性将有利于边缘的跟踪,形成正确的边缘等值线。通常,边缘图中每一边缘等值线上各边缘点的灰度值并不是“等值”的,因此,不能简单地以边缘点的灰度值作为构造等值线的“等值”条件,必须找出能刻画边缘点集共同特性的统一度量形式,以及边缘普遍表现出的灰度突变特性,能满足上述要求,并可方便地以微分运算作为量化途径。本质上,边缘检测过程就是对灰度突变特性的量化操作,一阶或二阶的微分算子均可形成对边缘点的定量描述:一阶微分算子将边缘的灰度突变特性量化成局部极值(梯度的幅度或方向),二阶微分算子则将其量化成零交叉点。由于LOG算子在抑制噪声的同时,能较好地检测到边缘点^[1],因此本文以LOG算子作为量化手段,构造出基于零交叉点集的“边缘等值线图”。经过LOG算子和图像间的卷积运算,零交叉点即为所要跟踪的边缘点,存在于离散的格网数据之中(格网点的值代表了该点的卷积值)。由于数字图像数据通常

以阵列形式描述,因此边缘等值线的生成与数字地面模型(DTM)中的等高线自动跟踪^[9]是相一致的。参考DTM中等高线的跟踪原理,边缘等值线生成过程如下。

1) 计算状态矩阵

为了记录零交叉点通过格网的情况,设任意格网点的值为 $Z_{i,j}$ ($i=0,1,\dots,n; j=0,1,\dots,m$),并设置两个状态矩阵 $H^{(K)}$ 与 $V^{(K)}$ 序列分别表示其穿过格网水平边与竖直边的状态:

$$H^{(K)} = \begin{bmatrix} h_{00}^{(k)} & \cdots & h_{0n}^{(k)} \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ h_{m0}^{(k)} & \cdots & h_{mn}^{(k)} \end{bmatrix}, V^{(K)} = \begin{bmatrix} v_{00}^{(k)} & \cdots & v_{0n}^{(k)} \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ v_{m0}^{(k)} & \cdots & v_{mn}^{(k)} \end{bmatrix}$$

其中, $m+1$ 为图像阵列的行数; $n+1$ 为图像阵列的列数;

$$v_{i,j}^{(k)} = \begin{cases} 1, & \text{格网点}(i,j)\text{的竖直边有零交叉点通过} \\ 0, & \text{格网点}(i,j)\text{的竖直边无零交叉点通过} \end{cases}$$

$$h_{i,j}^{(k)} = \begin{cases} 1, & \text{格网点}(i,j)\text{的水平边有零交叉点通过} \\ 0, & \text{格网点}(i,j)\text{的水平边无零交叉点通过} \end{cases}$$

$$i=0,1,\dots,n; j=0,1,\dots,m-1$$

显然,格网点 (i,j) 的水平边有零交叉点通过的条件为:

$$Z_{i,j} \circ Z_{i+1,j} < 0$$

格网点 (i,j) 的竖直边有零交叉点通过的条件为:

$$Z_{i,j} \circ Z_{i,j+1} < 0$$

考虑到算法的完整性,为避免出现上述条件判别式为零的情况,可对 $Z_{i,j}=0$ 的格网点进行预处理,根据该点水平邻域或竖直邻域的取值状况加(或减)上一个微小的数 $\epsilon > 0$ 。若优先考虑水平邻域,则:

$$Z_{i,j} = \begin{cases} +\epsilon, & Z_{i-1,j} < 0 \\ -\epsilon, & Z_{i-1,j} > 0 \end{cases}$$

若优先考虑竖直邻域,则:

$$Z_{i,j} = \begin{cases} +\epsilon, & Z_{i,j-1} < 0 \\ -\epsilon, & Z_{i,j-1} > 0 \end{cases}$$

上述处理在针对格网的四条边界上进行时,根据边界的水平或竖直状况分别优先考虑水平邻域或优先考虑竖直邻域;若数据点位于格网内部,则优先考虑水平邻域。

经过上述的预处理,状态矩阵 $H^{(K)}$ 与 $V^{(K)}$ 的元素为:

$$h_{i,j}^{(k)} = \begin{cases} 1, & Z_{i,j} \circ Z_{i+1,j} < 0 \\ 0, & Z_{i,j} \circ Z_{i+1,j} > 0 \end{cases}$$

$$v_{i,j}^{(k)} = \begin{cases} 1, & Z_{i,j} \circ Z_{i,j+1} < 0 \\ 0, & Z_{i,j} \circ Z_{i,j+1} > 0 \end{cases}$$

2) 搜索边缘等值线的起点

根据等值线图的特性,与格网边界不相交的等值线应闭合(称为闭曲线),与格网边界相交的等值线不应封闭(称为开曲线)。通常首先跟踪开曲线,即沿格网的四边界搜索,所有 $h_{i,0}^{(k)}=1 (i=0, 1, \dots, n-1)$ 、 $h_{i,m}^{(k)}=1 (i=0, 1, \dots, n-1)$ 、 $v_{0,j}^{(k)}=1 (j=0, 1, \dots, m-1)$ 、 $v_{n,j}^{(k)}=1 (j=0, 1, \dots, m-1)$ 的元素均对应着一条开曲线的起点(或终点)。在搜索到一条开曲线的起点后,将其相应的状态矩阵元素置零。处理完开曲线后,再处理闭曲线,此时可按先列(行)后行(列)的顺序搜索格网的水平边(或竖直边),所遇到的第一个有零交叉点通过的边即为闭曲线的起点边。闭曲线起点对应的状态矩阵元素仍保留原值 1,作为算法结束时的标志。

3) 边缘点位置的确定

经过步骤 1) 中对格网点的预处理,零交叉点存在于相邻的格网点之间,其位置坐标可通过线性内插确定。以图像阵列的左下角为坐标原点,水平边为 X 方向,竖直边为 Y 方向,建立图像坐标系,格网边的长 dx 与宽 dy 均为 1,则格网 (i, j) 水平边上零交叉点 $(Z=0)$ 的坐标 (x_p, y_p) 为:

$$x_p = i + \frac{-Z_{i,j}}{Z_{i+1,j} - Z_{i,j}}$$

$$y_p = j$$

式中, $i=0, 1, \dots, n; j=0, 1, \dots, m$ 。格网 (i, j) 竖直边上零交叉点的坐标 (x_q, y_q) 为:

$$x_q = i$$

$$y_q = j + \frac{-Z_{i,j}}{Z_{i,j+1} - Z_{i,j}}$$

式中, $i=0, 1, \dots, n; j=0, 1, \dots, m$ 。

4) 搜索下一边缘点

在找到起点后,即可顺序跟踪所有该边缘等值线上的零交叉点,为此将格网进行编号(1, 2, 3, 4),如图 1 所示,则边缘等值线的进入边号 in 有四种可能。设进入边号为 1 ($g_{in}=1$),统一按逆时针方向搜索该边缘等值线穿过此格网的离去边号 g_{out} ,即首先判断 2 号边,其次 3 号边,最后 4 号边,则有:

当 $v_{i+1,j}=1$ 时, $g_{out}=2$, 并令 $v_{i+1,j}=0$

否则当 $h_{i,j+1}=1$ 时, $g_{out}=3$, 并令 $h_{i,j+1}=0$

否则当 $v_{i,j}=1$ 时, $g_{out}=4$, 并令 $v_{i,j}=0$

对于上述情况,下一格网的编号与进入边号为:

$g_{out}=2$, 下一格网为 $(i+1, j)$, $g_{in}=4$

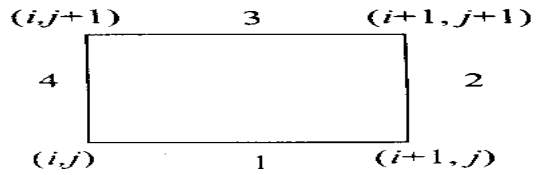


图 1 格网边编号

Fig. 1 Index to Grid Edge

$g_{out}=3$, 下一格网为 $(i+1, j)$, $g_{in}=1$

$g_{out}=4$, 下一格网为 $(i+1, j)$, $g_{in}=2$

同理可分析处理进入边号 $g_{in}=2, 3, 4$ 的情况。在搜索到下一零交叉点后,即可计算该点坐标。在上述整个过程中,将搜索到的每一零交叉点对应的状态矩阵元素置零是必要的,它表明该零交叉点已被处理过了。当状态矩阵 $H^{(K)}$ 与 $V^{(K)}$ 变为零矩阵时,所有的边缘等值线就被搜索出来了。

2.1.2 边缘等值线分裂

边缘等值线的分裂采用文献[3]中的分裂合并算法进行。为提供较好的初始直线段,在该算法中使用了较保守的阈值,以控制直线段的几何位置误差在允许范围内。

2.2 直线段的连接和合并

参考共线链编组^[10]的算法思想,直线段的连接和合并的实现过程如下。

2.2.1 连接矩阵的建立

设共有 n 条直线段,矩阵 C_{nn} 为 n 行 n 列的方阵,矩阵元素 C_{ij} 为直线段 i 与直线段 j 间的连接标志,若两直线段存在连接性,则 $C_{ij}=1$,否则 $C_{ij}=0$ 。显然,矩阵 C_m 为对称矩阵。考虑到存储空间及计算的开销,这里仅考虑矩阵 C_m 中的上三角矩阵。连接矩阵的建立过程如下。

1) 初始化。若 $i=j$, 则 $C_{ij}=1$, 否则 $C_{ij}=0$ 。

2) 连接性测试。对任意两直线段,测试包括以下内容:① 连接选取测试。若两直线段间夹角大于 45° , 则 $C_{ij}=0$ 否则,继续下一阶段的测试;② 共线性测试。设两直线段中点的连线与两直线段间的夹角分别为 θ_1, θ_2 , 若 $\theta_1 + \theta_2 > 25^\circ$, 则 $C_{ij}=0$, 否则,继续下一阶段的测试。③ 断裂测试。设两直线段中点的连线长度为 l , 两直线段的长度分别为 l_1, l_2 , 定义 g_h, g_v 分别表示横向和纵向断裂,其中,

$$g_h = l \cos \theta_1 / 2 + l \cos \theta_2 / 2$$

$$g_v = l \sin \theta_1 / 2 + l \sin \theta_2 / 2$$

若 $g_h < k_1(l_1 + l_2) / 2$ 且 $g_v < k_2$, 则 $C_{ij}=1$; 否则 $C_{ij}=0$ (k_1, k_2 为设定的比例常数)。

2.2.2 连接链的生成

搜索连接矩阵,找出通过连接性测试的一组相

关直线段。搜索时采用递归的算法对连接矩阵进行逐行扫描。设初始搜索行为 i , 若 $C_{ij}=1$, 则记录 j , 并令 $C_{ij}=0$, 令当前行为 j , 重复进行, 直至该行所有元素为 0, 返回。当连接矩阵中所有元素为 0 时, 整个搜索过程结束, 形成一定数目的连接链。

2.2.3 直线段的拟合

对单个连接链中所有直线段的端点进行最小二乘拟合, 求得直线方程。设直线方程描述为 $f(x)=ax+b$, 考虑到直线在接近 90° 时斜率 a 将趋于无穷大, 将直线方程分为斜率大于 45° 和小于 45° 两种表达方式, 即

$y = ax + b$, 直线与水平所交角绝对值 $\leq 45^\circ$

$x = ay + b$, 直线与水平所交角绝对值 $> 45^\circ$

现在假设直线方程为 $y = ax + b$, a 与 b 为待定常数, 以离散点 (x_i, y_i) 为观测值, 根据最小二乘法的原理, 选取如下方程:

$$M = \sum_{i=1}^n [y_i - (ax_i + b)]^2$$

在满足 M 最小时解算出 a 和 b , 得到直线方程的描述。

2.3 直线段的评价和几何纠正

显然, 经过 §2.1 抽取的初始直线段存在可靠性方面的问题。

1) 直线段存在的可靠性。由于没有对图像卷积产生的零交叉点进行过滤, 边缘图中存在由于噪声及某些边缘模型(staircase mode)而产生的伪边缘点, 因此在以起、终端点对直线段进行抽象描述时, 可能会导致错误的结果, 即图像上根本不存在由该起、终端点所描述的直线段。

2) 直线段位置的可靠性。零交叉点的“漂移”问题导致直线段位置的偏移。

上述问题可以借助于最小二乘模板匹配方法^[4-6](LSTM)来解决。设初步抽取的直线段为 L , 图像上与 L 相对应的实际直线段为 L' , $P(x, y)$ 为 L 上任意一点, $P'(x', y')$ 为 L' 上与 $P(x, y)$ 相对应的点, 则 $P(x, y)$ 与 $P'(x', y')$ 之间的关系可用仿射变换表达:

$$x' = a_1 + a_2x + a_3y$$

$$y' = b_1 + b_2x + b_3y$$

显然, 当计算出几何变形参数 $(a_1, a_2, a_3, b_1, b_2, b_3)$ 时, 即可完成直线段的精确定位。假定目标图像中灰度变化的形式为阶跃型, 并设 $f(x, y)$ 是给定理想直线段模板的灰度, $g(x, y)$ 为包含直线段 L' 的实际的局部图像块, 则两者理论上应满足 $f(x, y) = g(x, y)$, 但由于噪声的存在, 它们之间有误差:

$$f(x, y) - g(x, y) = e(x, y)$$

经过线性化, 对应的观测方程为:

$$f(x, y) - v(x, y) = g_0(x, y) + \frac{\partial g(x, y)}{\partial x} dx + \frac{\partial g(x, y)}{\partial y} dy$$

引入仿射变换关系:

$$f(x, y) - v(x, y) = g_0(x, y) + g_x da_1 + g_x x da_2 + g_x y da_3 + g_y db_1 + g_y x db_2 + g_y y db_3 \quad (1)$$

对直线段 L 上任意取整的坐标对, 均能按式(1)列出该误差方程式, 用矩阵形式表示为:

$$-v = AX - I; P$$

其中, I 是包含模板与实际图像灰度误差的观测值向量; X 为包含仿射变换参数的未知数向量; A 为系数矩阵; P 为对应的观测值权阵。显然, 可以通过大量的灰度观测值(冗余观测)来估计少量的仿射变换几何参数, 其最小二乘估计为:

$$X = (A^T P A)^{-1} A^T P I \quad (2)$$

作为精度指标的单位权方差为:

$$\sigma_0^2 = \frac{V^T P V}{n - t} \quad (3)$$

按照间接平差理论^[11], 根据单位权方差和协因数阵可计算出直线段端点的几何精度。给定阈值 σ_T , 可筛选出可信度大、定位精度高的直线段。

3 实验结果与结论

本文使用室内场景图片(灰度图像)对算法的有效性进行了验证。由于在形成初始直线段时, 采用了保守的阈值对边缘等值线实施分裂合并算法, 在随后的处理阶段中, 长的直线段被认为可信度高, 无论其精度指标是否超过计算阈值, 都将予以保留。此外, 为保证直线段连接和合并的正确性, 先以较宽松的阈值($\sigma_T = 5\sigma_M$, 其中 σ_M 为所有直线段端点精度的均值)对短的直线段实施 LSTM 操作; 在完成直线段连接和合并后, 再以保守的阈值($\sigma_T = 3\sigma_M$, 其中 σ_M 为所有直线段端点精度的均值)对所有直线段实施 LSTM 操作。

图2为原始的室内场景灰度图像; 图3是使用 IOG 算子($\sigma = 2.5$)对图2进行卷积处理, 采用本文的边缘跟踪策略进行边缘跟踪的结果; 图4是对边缘等值线实施分裂合并算法的结果; 图5是以较宽松的阈值对图4中的直线段实施 LSTM 进行筛选、纠正后的结果; 图6是对图5中的直线段实施连接和合并操作后的结果, 其中取 $k_1 = k_2 = 2.0$; 图7是以保守的阈值对图6中的直线段实施 LSTM 的最后结

果,图 8 是进行零交叉点跟踪及等值线生成过程的示意,其中,数字对应于灰度图像中各像素点进行 LOG 算子的结果,连续曲线为跟踪的结果。

实验结果表明:① 由于直线提取过程中充分使用了边缘信息,在去除不必要细节的同时,可较好地提取弱梯度的直线特征。② 由于使用了 LSTM 方法,提取直线段的定位准确,可精确到子像素级。③ 在实施直线段的连接和合并操作



图 2 场景灰度图像
Fig. 2 Grayscale Photo by CCD



图 3 等值线跟踪结果
Fig. 3 Result of Edge Contour Tracing



图 4 等值线分裂结果
Fig. 4 Result of Edge Contour splitting



图 5 初次 LSTM
Fig. 5 Result of Initial LSTM



图 6 直线段连接和合并结果
Fig. 6 Result of Straight Line Segment Linking and Merging



图 7 LSTM 结果
Fig. 7 Result of Final LSTM

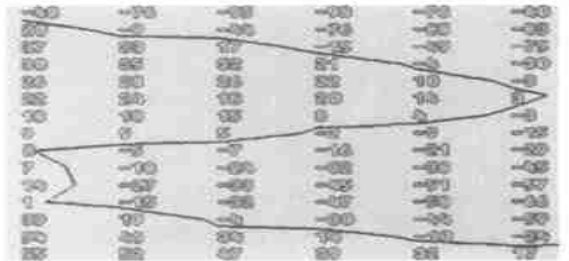


图 8 零交叉点跟踪示意图
Fig. 8 Result of Zero-crossing Tracing

时,为避免出现连接错误,进行了保守的断裂测试($k_1=k_2=2.0$),导致一些短的、间隔较远的弱梯度直线段无法进行连接和合并,以形成长的直线段特征,从而在随后的精度评定中损失掉了。因此,在设计直线段的连接和合并算法时,如何顾及短直线段的上下文关系,形成正确的连接链,对于完整地提取直线段特征是非常重要的。④ 在使用 LSTM 方法时,涉及到了较大的计算量,导致整个直线提取过程变慢,因此,如何预先剔除错误的直线段,减少不必要的 LSTM 计算,对提高算法的效率是很有必要的。

参 考 文 献

- 1 王润生. 图像理解. 长沙:国防科技大学出版社,1995
- 2 陆 军,王润生. 一种基于尺度空间理论的直线抽取算法. 中国图像图形学报,2000(8)
- 3 郑南宁. 计算机视觉与模式识别. 北京:国防工业出

- 出版社, 1998
- 4 Ackermann F. High Precision Digital Image Correlation. University of Stuttgart, 1983
- 5 Forstner W. On the Geometric Precision of Digital Correlation. IAPRS Comm. III, 1982(24): 176 ~ 189
- 6 Gruen A. Adaptive Least Square Correlation: a Powerful Image Matching Technique. South African Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 1985, 14(3): 175 ~ 187
- 7 孙家广. 计算机图形学. 北京: 清华大学出版社, 1998
- 8 Cronin. Automated Reasoning with Contour Maps. Computer & Geoscience, 1995, 21(5): 609 ~ 618
- 9 张祖勋, 张剑清. 数字摄影测量学. 武汉: 武汉测绘科技大学出版社, 1997
- 10 胡翔云. 航空遥感图像线状地物与房屋的自动提取: [学位论文]. 武汉: 武汉大学, 2002
- 11 於宗伟, 鲁林成. 测量平差基础. 北京: 测绘出版社, 1982
- 12 马颂德, 张正友. 计算机视觉——计算理论与算法基础. 北京: 科学出版社, 1998
- 13 Kenneth R C. Digital Image Processing. 北京: 电子工业出版社, 1998
- 14 Djemel Z, Scdvtore T. Edge Detection Techniques——an Overview. Pattern Recognition and Image Analysis, 1998, 8(4)
-
- 第一作者简介: 张祖勋, 教授, 博士生导师, 中国工程院院士。现从事摄影测量与遥感研究。代表成果: 全数字化自动测图系统 VirtuoZo; 《数字摄影测量学》等。
E-mail: zxzhang@supresoft.com.cn

A Method for Straight-Line Extraction Based on Line Space

ZHANG Zuxun¹ WU Jun¹ ZHANG Jianqing¹

(1 School of Remote Sensing and Information Engineering, 129 Luoyu Road, Wuhan 430079, China)

Abstract: This paper proposes an effective approach to extract straight-line feature from digital image. This approach is implemented in a collection of edge detecting based on discontinuity and continuity variation in image and straight-line estimation based on least square template matching algorithm. First, the convolution by LOG algorithm is done to the original digital image to locate the edge by detecting discontinuity variation in image. Then we apply the contour tracing principle to edge following process to find out edge contour and sequentially get initial line feature by splitting the edge contour into short and straight line segment with a rigid threshold. Last, the least square template matching algorithm is used to estimate the initial line by considering it as a whole space for all edges belonging to it and to make a geometrical correction only if it really exists.

Key words: digital image processing; straight-line extraction; LOG operator

About the first author: ZHANG Zuxun, professor, Ph. D supervisor, member of Chinese Academy of Engineering. His research field includes photogrammetry and remote sensing. His representative achievements are: a fully digital mapping system—VirtuoZo and literature “Digital Photogrammetry”.

E-mail: zxzhang@supresoft.com.cn

(责任编辑: 涓涓)