

高分辨率人造目标影像中伪直线剔除方法

王继阳¹⁾ 文贡坚¹⁾ 李德仁²⁾ 吕金建¹⁾

¹⁾(国防科技大学电子科学与工程学院 ATR 实验室,长沙 410073)

²⁾(武汉大学测绘遥感信息工程国家重点实验室,武汉 430072)

摘要 高分辨率影像中的伪直线是人造目标提取过程中增加计算复杂性和降低提取结果可靠性的一个主要因素。针对现有基于边缘检测的直线提取算法不能有效剔除伪直线的缺点,提出了一种可行的方法来剔除伪直线。该方法体现在直线提取的两个不同阶段:一是在边缘点编组前,通过引入 12 个过滤模板来剔除部分编组过程中可能拟合成伪直线的边缘点;二是对于已提取出来的每条直线,依据它们两侧邻域图像的灰度分布特性来判定直线的真伪。大量实验结果表明,该方法能够有效剔除由图像噪声或不规则天然地物拟合得到的绝大部分伪直线,而几乎不影响提取对应人造目标的真直线。

关键词 高分辨率图像 直线提取 人造目标提取 伪直线剔除

中图法分类号:TP391.41 文献标识码:A 文章编号:1006-8961(2009)06-1148-08

Filtering False Lines from High-resolution Images of Artificial Targets

WANG Ji-yang¹⁾, WEN Gong-jian¹⁾, LI De-ren²⁾, LÜ Jin-jian¹⁾

¹⁾(ATR Laboratory in School of Electronic Science and Engineering, National University of Defense Technology, Changsha 410073)

²⁾(State Key Laboratory of Information Engineering in Surveying, Mapping and Remote Sensing, Wuhan University, Wuhan 430072)

Abstract Appearance of the false lines is one of the major disturbing factors, which increases the complexity of the computation and reduces the stability of the extraction result, in the process of extracting artificial targets from high-resolution images. A robust two-step method is brought forward to filter the false lines extracted by the edge-based algorithms for extracting lines. Based on analysis of characteristics of false lines, in consideration that the lines extracted from artificial targets are regularly extraordinary, this method operates in two phase of the algorithms for extracting lines. One is that prior to grouping edges with co-lineation relationships, 12 models are employed to filter a proportion of edges, from which the false lines may be fitted later. The other is that after the process of extracting lines, the strength of the similarity of the image characteristic close to the line is defined firstly, in terms of which the lines extracted are divided into the true ones or the false ones, and the false lines will be filtered. Lots of experiments show that this method can filter a majority of the false lines extracted from image, which are corresponding with image noise or irregular natural objects, while the true lines which are corresponding with artificial targets are almost preserved.

Keywords high-resolution images, line extracting, artificial targets extracting, filtering false lines

1 引言

随着遥感技术的发展,利用卫星或航空遥感图

像进行人造目标检测与识别,以及基于立体图像或多视角图像的人造目标 3 维重建已成为当前图像分析与理解、计算机视觉以及摄影测量与遥感领域研

基金项目:国家高技术研究发展计划(863)基金项目(2006AA12Z140);国家自然科学基金项目(40571103)

收稿日期:2007-04-13;改回日期:2008-02-22

第一作者简介:王继阳(1980~),男。现为国防科技大学电子科学与工程学院信息与通信工程专业博士研究生。主要研究方向是摄影测量与遥感、图像处理与分析等。E-mail:sunrice_yy@yahoo.com.cn

究的热点问题。这些人造目标包括机场、道路、建筑物等,它们通常具有较规范的几何形状,利用直线特征能很好地描绘它们的轮廓。因此,从图像中可靠地提取直线特征成为解决人造目标提取的关键。

已有的直线提取算法很多,其中有代表性的方法是基于 Hough 变换的方法^[1-2]、层次记号编组的方法^[3]、基于相位编组的方法^[4]以及基于 Kalman 滤波的方法^[5]等。已有的这些直线提取算法及其改进算法在一定的应用环境下取得了较好的直线提取结果,但当图像内容复杂且受噪声干扰较为严重时,则可能会得到大量的源自图像噪声或不规则自然物的伪直线。虽然基于 Hough 变换的方法的抗噪声性能比较优越,但该方法的性能依赖于窗口的选择,窗口过小,容易出现由噪声点引发的伪直线,而窗口过大,则容易造成直线的过连接;层次记号编组的方法引入了多分辨的思想,通过迭代连接短直线来得到全部直线段,但该方法对噪声比较敏感,当噪声边缘密度较大时,更容易出现伪直线和直线的过连接;基于相位编组的方法是通过编组梯度相位相同的像素点来拟合得到直线,虽较好地解决了密集直线的提取问题,但该方法得到的结果中过连接现象比较严重,且直线定位不够准确,并会造成伪直线的出现;基于 Kalman 滤波的方法将提取直线的过程视为从受白噪声干扰的匀速直线运动中通过滤波来得到点的轨迹,不仅具有一定的抗噪声能力,且直线定位准确,极少出现过连接,但由于该方法区分弱直线和由噪声引发伪直线的能力较弱,因此在提高弱直线提取能力的同时,也会增加伪直线出现的可能性。另外,还有其他的直线提取算法,如基于小波的方法^[6]、基于主成分分析的方法^[7]、基于均值漂移的 Hough 域聚类方法^[8]等等,同样都有产生伪直线的可能性。

鉴于伪直线的大量出现对目标轮廓的描述以及目标影像间的直线匹配带来了极大的困难,为此本文从真实直线和伪直线的实际含义出发,提出了一套适用于不同直线提取算法的伪直线剔除方法。

2 伪直线剔除方法

利用高分辨率图像对人造目标进行提取或特征分析,感兴趣的直线有以下两种:一是两个空间平面的交线,如墙角、屋脊线等;二是空间平面内灰度差别显著区域的交界线,如目标的阴影、道路上的交通

标志线等。已有的直线提取算法在提取这些真实直线的同时,还会提取到一些由噪声或自然物等周边环境引发的伪直线,它们会对人造目标的提取造成干扰,归结其产生的来源主要有以下两个:一是由植被(如草坪、灌木丛或树木等)或其阴影以及起伏地形或河流产生的直线;二是由于图像获取手段的不理想而错误提取的直线,如图像噪声或图像上的划痕引发的直线。

通过对大量遥感图像的分析可以发现,从遥感图像中提取的组成人造目标轮廓的两种直线具有一个共同特征,即这些直线所在的图像灰度区域的边界具有非常规范的形态,即沿直线两侧的邻域图像灰度特性均匀一致或者分块一致,且两侧区别明显。这一特征决定了拟合该类直线的边缘点排列的规范性以及直线两侧邻域影像灰度分布特性的差异性,这一点也是本文提出的伪直线剔除方法的依据。不同的是,伪直线的第1个来源通常代表参差不齐的两个灰度区域的边界线,由于拟合成这类直线的边缘链通常具有分支结构或出现弯曲,而不再具有规范的形态,且直线两侧或一侧包含有与另一侧相似灰度分布特性的区域,从而使得该类直线两侧邻域影像的整体灰度分布特性趋于相似;伪直线的第2个来源可看作是由分布于均匀灰度区域的图像噪声点拟合得到的,且拟合成该类直线的边缘点表现出杂乱无章的状态,而其两侧邻域的灰度统计特性则更为相似。

基于以上认识,本文提出以下两种剔除伪直线的方法:一是定义不规则边缘模板,用于剔除部分可能拟合成伪直线的边缘点;二是统计直线两侧邻域图像的灰度分布特性,可据此定义一个互相关系数用来衡量直线邻域图像的相似性,并判定直线的真伪。

2.1 不规则边缘点剔除方法

大多数直线提取算法的第1步通常是得到边缘图像,其采用的方法多是 Canny 边缘检测算法^[9],由于其可以得到高定位精度的单像素宽度边缘,而接下来的直线提取则是基于边缘点的操作,因此边缘检测的性能直接影响后续直线提取算法的直线提取效果。

优秀的直线提取算法必须能够在检测到所有重要的直线,尤其是弱直线的同时,不增加伪直线的出现。为了检测到真实的弱直线,必须降低边缘检测门限,以获取隶属于它们的边缘点,但由于在得到这些边缘点的同时也将引入更多的由噪声和由自然物产生的两类不规则边缘点,从而造成其在边缘图像

中的密集分布,这将极大增加直线提取的计算复杂性和出错概率。以往的做法通常是根据图像的特点,在弱直线检测能力和减少伪直线提取之间做出折中。

由于构成伪直线的噪声点和模糊区域边界点本身排列是不规则的,因此利用直线提取算法进行直线拟合时理论上很难形成一条直线,但当这些边缘点密度增大时,则往往可能由其拟合出一条原本不存在的直线(伪直线)。为了有效减少这些伪直线,通过剔除两类不规则边缘点来降低边缘图像中不规则边缘点的密度就成为一个可行方案。根据真实直线和伪直线在边缘图像中表现出来的差异,本文提出了一套用于剔除不规则边缘点的模板。由于 Canny 算法中是采用非极大值抑制操作,其得到的真实直线边缘沿与边缘垂直方向将只包含单像素宽度,又由于真实直线边缘点排列的规范性,因此,真实直线的边缘点模式可表示成如图 1 所示的 3 种形式,其他模式可由这 3 种模式旋转得到。而不规则

边缘链则通常具有较大的曲率或出现分支,其可由图 2 中所示的 12 个模板体现。在进行边缘点处理时,图 2 中模板的中心点被认定为构成伪直线的边缘点。具体的处理方法如下:对于图 2(a)~图 2(d)模板,待判定的边缘点(即模板区域的中心点,下同)将被剔除掉;对于图 2(e)~图 2(h)模板,待判定的边缘点及其 8 邻域中在水平或垂直方向上仅有的一个边缘点将被剔除;对于图 2(i)~图 2(l)模板,待判定的边缘点及其 8 邻域的两个边缘点将被剔除。

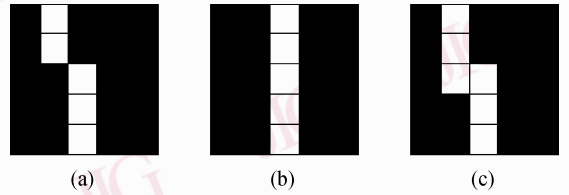


图 1 真实直线的边缘模板
Fig. 1 The edge models from true lines

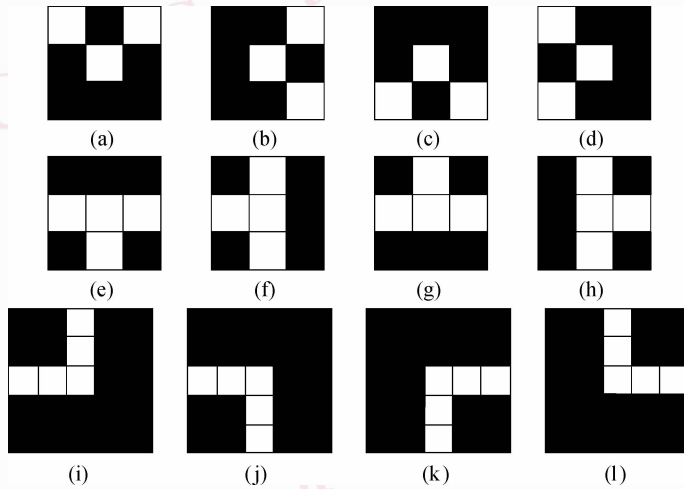


图 2 不规则边缘点的模板
Fig. 2 The models for the irregular edges

当然,符合图 2 所示模板的被剔除的边缘点有可能就是直线交叉点或受噪声干扰的直线边缘点,由于剔除它们将使直线发生断裂或欠连接,从而使直线提取结果失真。这一问题的解决办法在后面将会详细阐述。

2.2 基于直线邻域灰度分布特性的伪直线剔除算法

基于以上的不规则边缘点剔除方法,可以在一定程度抑制由噪声点拟合的伪直线。从处理结果看,由于在提高弱边缘检测能力的同时,极大增加了边缘点的密度,且应用不规则边缘点剔除方法后,仍

保留有大量边缘点,因此,直接进行直线提取,仍会提取较多的伪直线。为进一步剔除这些伪直线,本文提出了一种稳健的伪直线剔除算法,该算法适用于包括不基于边缘检测方法在内的大多数直线提取算法。

已有的直线提取算法及改进算法,大都是先把直线看成是边缘点或像素点的集合,然后通过逐点添加共线的边缘点或具有相同灰度梯度相位的像素点的方法来拟合得到直线,这显然是一种局部的方法。就直线提取的目的和人眼的视觉习惯来说,待提取的直线可能是同一平面中不同灰度图像区域的分界线或是两个平面的交线,其两侧图像的整

体灰度特性是有区别的。这种观点对于人造目标直线的提取是成立的,并可使真直线更好地区别于由不规则边缘点拟合得到的伪直线,由于利用了更大范围的图像信息,因此得到的提取结果将更加可靠。

本文针对真实直线和伪直线的这种特征差异性,以直线两侧邻域的灰度统计特性的相关性来衡量其灰度分布特性的差别,而灰度统计特性的相关性则由直线两侧图像邻域灰度直方图的互相关系数来表示。直线两侧图像邻域的灰度直方图分别用 v_1 和 v_2 两个矢量表示,同时引入了互相关系数的概念,并首先计算以下几个量:

$$s_{1,2} = \sum_i (v_{1,i} - \bar{v}_1)(v_{2,i} - \bar{v}_2) \quad (1)$$

$$s_{1,1} = \sum_i (v_{1,i} - \bar{v}_1)^2 \quad (2)$$

$$s_{2,2} = \sum_i (v_{2,i} - \bar{v}_2)^2 \quad (3)$$

其中, $v_{1,i}$ 和 $v_{2,i}$ 分别为两个邻域直方图中同灰度级的值, \bar{v}_1 和 \bar{v}_2 分别为两个邻域直方图的均值,则度量直线两侧图像邻域灰度分布特性相似性的互相关系数为

$$r = \frac{s_{1,2}}{\sqrt{s_{1,1}} \cdot \sqrt{s_{2,2}}} \quad (4)$$

给定门限 T , 如果 $r > T$, 则认为两块图像区域灰度分布特性相似, 即判定该直线为伪直线。

另外, 有些相距很近的真实直线, 由于可能造成在很小的范围内灰度分布特性发生多于一次的变化, 因此根据以上直线真伪判定的条件, 有可能被判定为伪直线。对于这类问题, 本文不仅考虑引入了直线的空间关系特性, 并增加了邻域内是否包含平行直线段的判定依据, 以提高判定的可靠性, 因为通常情况下, 只有人造目标具有平行等规则的几何结构, 而伪直线大都是杂乱分布的, 很难具有这种严格的几何关系, 而且具有平行结构的直线段可以相互支持, 所以可直接被判定为真实直线。

2.3 直线断裂和欠连接问题解决办法

直线的断裂和欠连接是直线提取算法中普遍存在的问题, 它破坏了原有结构中直线特征间的拓扑关系。安徽大学汤进等人提出了一种利用直线相似性来解决直线断裂问题以及用直线交点和图像角点的位置关系解决欠连接问题的方法^[10]。实验证明, 该方法能够对直线断裂和欠连接问题实现改善。

针对因不规则边缘点的错误剔除可能带来的直

线断裂和欠连接问题, 本文采取了利用被剔除边缘点来对“真实”直线段进行修补的方法, 即首先对被剔除的边缘点进行记录; 然后, 在经过直线提取和伪直线剔除后, 再结合“真实”直线段的端点坐标和倾角, 给定一个误差范围, 用于判定被剔除的边缘点是否可看作是真实直线的自然延伸, 以此决定是否可用此边缘点对直线段进行修补; 最后, 对于可修补的边缘点, 在靠近它的直线一端沿直线方向延长一个像素长度, 若在此过程中遇到另一条直线段的端点, 且它们的倾角相同, 则对它们进行合并, 否则只作为相互连接的线段, 同时妥善处理交叉点。

3 算法实现

本文提出的包含伪直线剔除功能的直线提取算法的具体步骤归纳如下:

- (1) 利用设定的 12 个模板来修正边缘检测图像(针对不同的提取算法, 这一步可以省略);
- (2) 利用常规方法提取直线;
- (3) 获取直线, 判断在它邻域内是否有与之近似平行且沿直线方向有显著重叠的线段, 如果有, 则判定该线段为真实线段, 重复步骤 3, 否则, 进入步骤 4;
- (4) 获取待判定直线段的两侧同样宽度的图像邻域作为支持区, 同时对两个支持区图像进行直方图统计, 并用统计结果计算互相关系数;
- (5) 将计算得到的互相关系数与设定的门限进行比较, 若大于门限, 则该直线段将被剔除。若有直线未经过判定, 则返回步骤 3, 否则进入下一步;
- (6) 利用被剔除的不规则边缘点修补直线。

4 实验结果和分析

实验选取了 3 幅真实的高分辨率航空影像, 这 3 幅影像分别覆盖修理厂、民居、草坪、阴影、树木以及车辆等多种目标或地物。本文设计了以下两组实验:

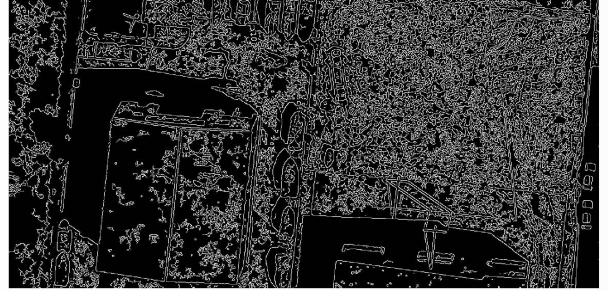
- (1) 实验 1, 使用的修理厂航空遥感影像如图 3(a) 所示, 实验时利用基于 Kalman 滤波的直线提取算法进行直线提取, 并分别给出了 Canny 边缘检测的结果和直接的直线提取结果(如图 3(b) 和图 3(c) 所示), 剔除符合设定模板的不规则边缘点后的边缘图像和直线提取结果如图 3(d) 和图 3(e) 所示, 经过本文提出的伪直线剔除算法剔除后的提取结果如图 3(f) 所示, 被错误剔除的直线段如图 3(g) 所示及未能剔除的伪直线如图 3(h) 所示;

(2) 实验 2, 使用的民居航空遥感影像如图 4(a) 所示, 实验时分别采用基于 Kalman 滤波的直线提取算法和基于相位编组的直线提取算法进行直线提取, 直接的直线提取结果如图 4(b) 和图 4(f) 所示, 而分别经过伪直线剔除算法剔除后的直线提取结果如图 4(c) 和图 4(g) 所示, 分别被错误剔除的直线

段如图 4(d) 和图 4(h) 所示和未能剔除的伪直线如图 4(e) 和图 4(i) 所示。表 1 和表 2 给出了对实验结果的统计。其中, 图 3(g)、图 3(h) 及图 4(d)、图 4(e) 和图 4(i) 中的白色线表示对应的直线处理结果, 图 4(h) 中的白色线和房屋正面墙角的两条黑线表示对应的直线处理结果。



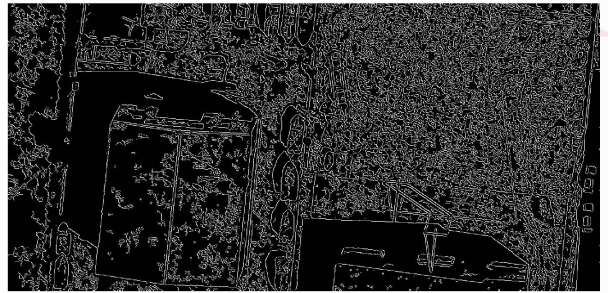
(a) 原始航空遥感图像



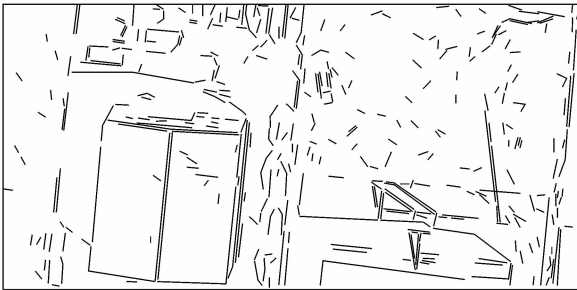
(b) Canny边缘检测结果



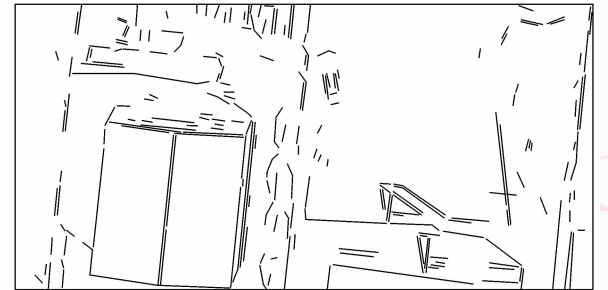
(c) 基于Kalman滤波的直线提取方法提取的直线



(d) 经不规则边缘点剔除后提取的直线



(e) 剔除符合不规则边缘模板的边缘点后的直线提取结果



(f) 经过伪直线剔除算法剔除伪直线后提取的直线



(g) 被错误剔除的真直线



(h) 未剔除的伪直线

图 3 修理厂航空遥感图像及其直线提取结果

Fig. 3 The aerial image of repairing works and the result of line extracting from it

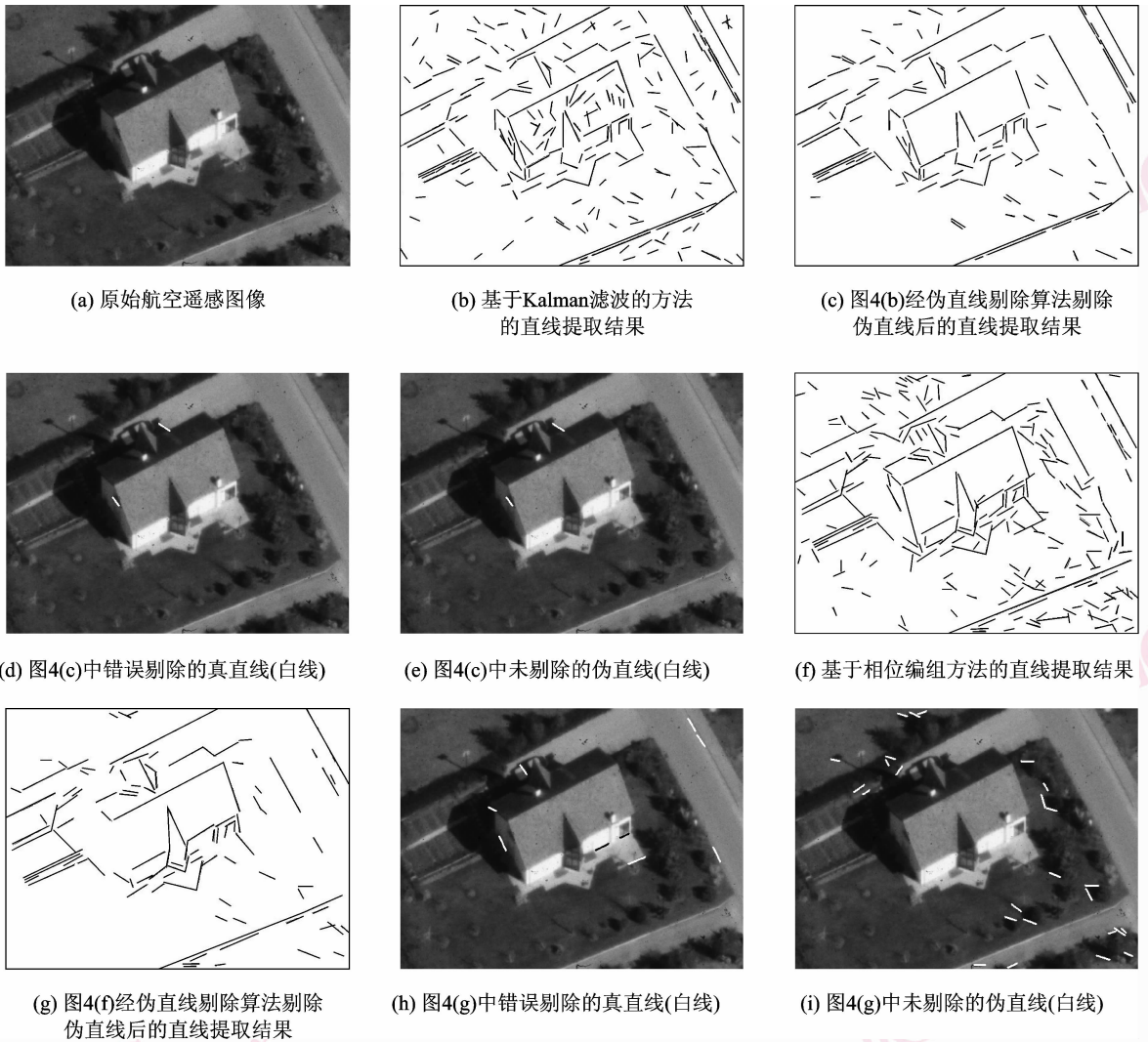


图 4 民居航空遥感图像及其直线提取结果

Fig. 4 The aerial image of a house and result of line extracting from it

类似于目标检测中虚警率和漏警率的定义,为了衡量本文方法的有效性,引入以下两项指标:

(1) 最终提取的直线中包含伪直线的比例定义为

$$R_f = \frac{N_{fr}}{N_t} \quad (5)$$

其中, N_{fr} 为经过伪直线剔除后未被剔除的伪直线数, N_t 为经过伪直线剔除后最终提取到的总直线数。

(2) 常规直线提取方法提取到的真实直线中,最终被错误剔除的比例的定义为

$$R_r = \frac{N_e}{N_o - N_f} \quad (6)$$

其中, N_e 为被错误剔除的真实直线数, N_o 为利用常

规直线提取算法提取到的总直线数, N_f 为用常规直线提取算法提取到的所有直线中总的伪直线数。另外,定义 N_d 表示最终被剔除掉的直线数, N_{dc} 表示剔除部分边缘点后提取到的直线数。

由表 1 的统计结果可以看出,在经过剔除不规则边缘点和利用伪直线剔除算法剔除伪直线后,伪直线大量减少,从而使真实直线所表征的目标轮廓更加清晰。由图 3(g) 可以看到,被错误删除的真实直线有 14 条,它们大多属于同一空间平面中灰度差异区域的边界线,但由于其两侧邻域影像的边界比较模糊,且直线段长度短,灰度分布特性对比不明显,从而造成了直线真伪判定出错;而未被剔除的伪直线有 34 条,可分为以下 3 类:

(1) 遥感图像数字化时引入的划痕引发的直线,

表 1 修理厂航空遥感影像的直线提取结果

Tab. 1 The result of line extracting from the aerial image of repairing works

指标项	N_o	N_{de}	N_l	N_f	N_d	N_e	N_{if}	$R_f(\%)$	$R_r(\%)$
直线数	568	431	271	317	297	14	34	12.5	5.6

共 12 条,通常划痕只具有很窄的宽度,从而其两侧灰度分布特性较为接近,可以利用本文方法将其剔除,但由于该图中划痕的宽度较宽,直线两侧灰度统计特性差别显著,且多段直线以平行的方式出现,表现出严格的规范性,故利用本文方法未能剔除;

(2)边界比较规则的自然物的阴影线造成的直线,共 10 条,这类直线两侧灰度对比度较大,其灰度

统计特性差别同样比较显著,且形态较为规则;

(3)由于邻域内出现平行直线段或由于地物差别引起的直线两侧灰度统计特性的差异性等原因而被错误地判定为真实直线的共 12 条。

为了证明本文方法应用于不同图像和不同直线提取算法时的稳健性,特设计了如图 4 所示的实验,实验统计结果列于表 2。

由于基于相位编组的方法并不包含利用 Canny

表 2 民居和厂房航空遥感图像的直线提取结果

Tab. 2 The result of line extracting from the aerial image of the house and the workshop

直线提取方法	N_o	N_{de}	N_l	N_f	N_d	N_e	N_{if}	$R_f(\%)$	$R_r(\%)$
基于 Kalman 滤波的方法	249	193	136	136	113	2	24	17.6	1.8
基于相位编组的方法	258	/	113	163	145	9	27	23.9	9.5

算法提取图像边缘的步骤,因此实验结果中没有针对基于相位编组的方法给出剔除部分边缘点后的直线提取结果,但实验证明,第 2 种基于直线两侧灰度分布特性的伪直线剔除方法则可以很好地适用于该直线提取算法,这表明本方法的使用并不局限于基于边缘检测的直线提取算法;另外,由于基于相位编组的方法提取的直线定位不准确,且存在显著的过连接现象,因此使得目标区域的多条直线提取错误或误差明显,而被作为伪直线剔除。由于伪直线剔除算法的应用,致使人造目标轮廓线提取中存在的错误得到了有效纠正。

由两组实验结果可以看出,本文方法几乎可以剔除全部由图像噪声拟合而得到的伪直线,而剔除由自然物,尤其是其阴影拟合得到伪直线的性能则要稍差一些,尤其难于剔除形态比较规则的自然物阴影边界线。另外,从实验的结果还可以看到,在进行不规则边缘点剔除后,再进行直线提取,由于弱化了不规则边缘点的干扰,因此可以提取到少数原本未能提取到的直线。

5 结 论

本文从真实直线所代表的实际含义出发,将直线看作是二个灰度区域的边界,且这两个区域的灰度分布特性存在差异,提出了通过比较直线两侧图像邻域的灰度分布特性来辨别直线真伪的方法,并结合对边缘图像进行模板修正来自动剔除掉已有边缘提取方法得到的绝大部分由图像噪声或自然物引发的伪直线,从而使得目标轮廓更加清晰。

本文提出的方法能够在剔除伪直线的同时保留真实直线,尤其是可以保留两侧灰度对比度较弱的真实直线,这就较好地解决了直线提取过程中既不想丢掉真实的弱直线,又不想引入伪直线的矛盾。然而,算法目前存在的主要问题是解决伪直线剔除对于真实直线的影响问题,以及互相关系数门限值的固定化与整个图像灰度对比度变化范围较大的矛盾,下一步将对这两个问题进行研究。

参考文献 (References)

- 1 Illingworth J, Kittler J. A survey of the Hough transform [J]. *Computer Vision, Graphics and Image Processing*, 1988, **44** (1): 87-116.
- 2 Cha J, Cofer R H, Kozaitis S P. Extended Hough transform for linear feature detection [J]. *Pattern Recognition*, 2006, **39** (6): 1034-1043.
- 3 Boldt M, Weiss R, Riseman E. Token-based extraction of straightlines [J]. *IEEE Transactions on System, Man Cybernetics*, 1989, **19** (7): 1581-1594.
- 4 Burns J, Hanson A, Riseman E. Extracting straight lines [J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligent*, 1986, **8** (4): 425-455.
- 5 Wen Gong-jian, Wang Run-sheng. A robust approach to extracting straight lines [J]. *Journal of Software*, 2001, **12** (11): 1660-1666. [文贡坚,王润生. 一种稳健的直线提取算法 [J]. *软件学报*, 2001, **12** (11): 1660-1666.]
- 6 Ishida T, Itagaki S, Sasaki Y, *et al.* Application of wavelet transform for extracting edges of paddy fields from remotely sensed images [J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2004, **25** (2): 347-357.
- 7 Lee Y S, Koo H S, Jeong C S. A straight line detection using principal component analysis [J]. *Pattern Recognition Letters*, 2006, **27** (14): 1744-1754.
- 8 Bandera A, Perez-Lorenzo J M, Bandera J P, *et al.* Mean shift based clustering of Hough domain for fast line segment detection [J]. *Pattern Recognition Letters*, 2006, **27** (6): 578-586.
- 9 Canny J F. A computational approach to edge detection [J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligent*, 1986, **8** (6): 679-698.
- 10 Tang Jin, Luo Bin. Solving the soft link problem in straight line extraction [J]. *Journal of Image and Graphics*, 2003, **8** (z1): 381-383. [汤进,罗斌. 直线提取中断裂和欠连接问题的研究 [J]. *中国图象图形学报*, 2003, **8** (z1): 381-383.]