

基于小波变换的卫星遥感地图中建筑物识别

赵 洁, 李光耀, 庞池海, 朱恒晔

(同济大学 CAD 研究中心, 上海 201804)

摘 要:建筑物作为城市的一个重要特征,对它的识别已经被广泛应用在城市仿真等许多领域。目前,传统方法通常采用基于建筑物边缘线性特征的识别算法,虽然该方法具有简单高效的特点,但识别率较低。提出了一套基于小波变换的建筑物识别方法。首先,利用二进小波变换检测建筑物边缘,然后通过计算基于小波的仿射不变量识别建筑物,最后构建了建筑物轮廓模式数据库。实验结果表明所提方法能够准确有效地识别卫星遥感地图中的建筑物。

关键词:建筑物识别;卫星遥感地图;小波变换;仿射不变量

中图分类号:TP391.41

文献标识码:A

文章编号:1673-629X(2008)11-0243-04

Research on Building Recognition from Satellite Remote Sensing Image Based on Wavelet

ZHAO Jie, LI Guang-yao, PANG Chi-hai, ZHU Heng-ye

(CAD Research Center, Tongji University, Shanghai 201804, China)

Abstract: Building is an essential characteristic of a city. The recognition of it has been applied broadly in many fields like urban simulation. Utilizing linear feature of building border was now widely used in traditional building recognition. Though simple, the recognition accuracy of these methods was low. A novel method of recognizing building from remote sensing images based on wavelet analysis and affine invariant was proposed. Firstly, dyadic wavelet was used to extract the edge, and then buildings were recognized by computing the affine invariants. In addition, a building recognition pattern database was constructed. Experimental results show that the proposed method can recognize building from remote sensing images both correctly and efficiently.

Key words: building recognition; satellite remote sensing image; wavelet analysis; affine invariant

0 引 言

在城市区域的卫星遥感地图中,80%的目标是建筑物和道路。建筑物作为城市的一个必不可少的核心组成部分,对它的识别和提取已经被广泛应用在城市仿真、城市规划等领域。随着现代化卫星遥感技术的发展,高分辨率的卫星遥感地图使得对卫星地图中的建筑物进行识别变得更加可行。

屋顶形状是卫星图片中建筑物的一个最重要的特征,根据对屋顶边缘的识别来识别建筑物是识别卫星遥感地图中的建筑物的有效可行的办法。

该项研究始于20世纪80年代末期。Shufelt等人^[1]提出了基于屋顶边缘识别的理论,它包含以下四个步骤:边缘提取,线段检测,建筑物多边形假定,建筑物多边形确定。Tao等人^[2]通过比较检测到的建筑物

边缘的平行度来做线段检测,并将它们分类,得到几种矩形结构单元。Yang等人^[3]利用建筑物的灰度差和背景对图像做分割得到建筑物区域。总之,这些方法都有一个共同点,都是采用基于建筑物边缘线性特征的识别算法。但是,由于卫星遥感图片的相对较低的对比度,要通过边缘线性特征得到所有的结构特征是很困难的;同时,线段检测是完全基于边缘检测的,而检测到的边缘往往是不连续的线段或曲线,其中肯定会有有效信息的丢失和虚假信息的参杂。

文中在卫星遥感地图中建筑物的识别上引入了基于小波的仿射不变量的概念,提出了一个新的基于小波变换的卫星遥感地图中建筑物识别的方法。首先利用二进小波提取边缘;然后,通过优化处理和跟踪算法得到封闭曲线后对每个建筑物的轮廓分别计算基于小波的仿射不变量;最后构建了一个建筑物识别模式数据库,通过对检测到的建筑物轮廓和数据库中构建的建筑物轮廓的仿射不变量作比较,得到相匹配的模式。实验结果表明所提方法能够准确有效地识别卫星遥感

收稿日期:2008-02-15

作者简介:赵 洁(1983-),女,硕士研究生,研究方向为图像处理、城市仿真、虚拟现实;李光耀,教授,博导,研究方向为图像处理、城市仿真。

地图中的建筑物。

1 基于二进小波的建筑物边缘检测

二进小波介于连续小波和离散小波之间,它对连续小波及其变换在尺度参量上进行二进制离散,而在时间域上的平移量仍保持连续变化,因此二进小波仍具有连续小波变换的时移不变性,这对于信号检测和边缘检测是十分重要的。因此,文中利用二进小波对图像做第一步的边缘检测工作。

设一幅建筑物图像二维函数为 $f(x, y)$, 对其做二进小波边缘检测。由

$$S_2 f(x, y) = \sum_{l \in \mathbb{Z}} \sum_{k \in \mathbb{Z}} h_l h_k S f(x-l, y-k) \quad (1)$$

得到平滑的图像。通过计算

$$W_2^1 f(x, y) = \sum_{l \in \mathbb{Z}} \sum_{k \in \mathbb{Z}} g_l l_k S f(x-l, y-k) \quad (2)$$

得到水平边缘图像,由

$$W_2^2 f(x, y) = \sum_{l \in \mathbb{Z}} \sum_{k \in \mathbb{Z}} l_l g_k S f(x-l, y-k) \quad (3)$$

得到垂直边缘图像,最后通过计算梯度向量模型

$$M_2 i f(x, y) = \sqrt{(W_2^1 i f)^2 + (W_2^2 i f)^2} \quad (4)$$

得到建筑物边缘图像。

2 利用小波变换推导仿射不变量描述建筑物轮廓

2.1 仿射不变量的定义

设二维空间物体边缘轮廓的参数方程为 $[x, y]$, 该物体经仿射变换后边缘轮廓的参数方程为 $[x', y']$, 于是有

$$\begin{bmatrix} x' \\ y' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_1 & a_2 \\ b_1 & b_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} a_0 \\ b_0 \end{bmatrix}$$

其中,非奇异方阵 $A = \begin{bmatrix} a_1 & a_2 \\ b_1 & b_2 \end{bmatrix}$ 代表物体作旋转、伸

缩、扭曲等变换, $B = \begin{bmatrix} a_0 \\ b_0 \end{bmatrix}$ 代表物体作平移变换。

一般的,图像经仿射变换后坐标系统的改变可以用雅可比行列式 $J = \det(A)$ 来表达。设某个量在仿射变换前后分别为 I, I' , 若满足 $I' = IJ^n$, 称 I 为仿射不变量。

2.2 基于小波变换的六层仿射不变量

计算机视觉中常用二次曲线推导几何不变量。设过点 (x, y) 的二次曲线方程为:

$$[x, y] P \begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} = a$$

其中, a 是常数, $P = \begin{bmatrix} p_{11} & p_{12} \\ p_{12} & p_{22} \end{bmatrix}$ 是对称矩阵, Weiss 等人^[4] 定义

$$I = p_{11} p_{22} - p_{12} p_{12} = p_{11} p_{22} - p_{12}^2$$

可以证明 I 是一个仿射不变量。

设 $Q = \begin{bmatrix} q_{11} & q_{12} \\ q_{12} & q_{22} \end{bmatrix}$ 也是对称矩阵,

$$[x, y] Q \begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} = a$$

由 P, Q 决定的两条二次曲线的联合不变量为:

$$I = p_{11} q_{22} + p_{22} q_{11} - 2 p_{12} q_{12}$$

类似的,可用两个三层的 $W_{ix}(t), W_{iy}(t), i \in (l_1, l_2, l_3)$ 和 $W_{ix}(t) W_{iy}(t), i \in (l_4, l_5, l_6)$, 引进基于小波的二次曲线方程:

$$[W_{ix}(t) \ W_{iy}(t)] \Gamma(t) \begin{bmatrix} W_{ix}(t) \\ W_{iy}(t) \end{bmatrix} = 1$$

和

$$[W_{ix}(t) \ W_{iy}(t)] \Gamma'(t) \begin{bmatrix} W_{ix}(t) \\ W_{iy}(t) \end{bmatrix} = 1$$

其中,对称矩阵 $\Gamma(t) = \begin{bmatrix} \gamma_{11}(t) & \gamma_{12}(t) \\ \gamma_{21}(t) & \gamma_{22}(t) \end{bmatrix}$,

$$\Gamma'(t) = \begin{bmatrix} \gamma_{33}(t) & \gamma_{34}(t) \\ \gamma_{43}(t) & \gamma_{44}(t) \end{bmatrix}$$

由此可以定义一个联合仿射不变量:

$$\eta(t) = \gamma_{11}(t) \gamma_{44}(t) + \gamma_{22}(t) \gamma_{33}(t) - 2 \gamma_{12}(t) \gamma_{34}(t)$$

文中用六层的小波变换系数代替上式中的变量表示如下:

$$\begin{aligned} \eta_{1,2,3,4,5,6}(t) = & \begin{vmatrix} 1 & 2W_{1x}(t)W_{1y}(t) & W_{1y}^2(t) \\ 1 & 2W_{2x}(t)W_{2y}(t) & W_{2y}^2(t) \\ 1 & 2W_{3x}(t)W_{3y}(t) & W_{3y}^2(t) \end{vmatrix} \cdot \\ & \begin{vmatrix} W_{4y}^2(t) & 2W_{4x}(t)W_{4y}(t) & 1 \\ W_{5y}^2(t) & 2W_{5x}(t)W_{5y}(t) & 1 \\ W_{6y}^2(t) & 2W_{6x}(t)W_{6y}(t) & 1 \end{vmatrix} + \\ & \begin{vmatrix} W_{1y}^2(t) & 2W_{1x}(t)W_{1y}(t) & 1 \\ W_{2y}^2(t) & 2W_{2x}(t)W_{2y}(t) & 1 \\ W_{3y}^2(t) & 2W_{3x}(t)W_{3y}(t) & 1 \end{vmatrix} \cdot \\ & \begin{vmatrix} 1 & 2W_{4x}(t)W_{4y}(t) & W_{4y}^2(t) \\ 1 & 2W_{5x}(t)W_{5y}(t) & W_{5y}^2(t) \\ 1 & 2W_{6x}(t)W_{6y}(t) & W_{6y}^2(t) \end{vmatrix} - \\ & 2 \begin{vmatrix} W_{1x}^2(t) & 1 & W_{1y}^2(t) \\ W_{1x}^2(t) & 1 & W_{2y}^2(t) \\ W_{1x}^2(t) & 1 & W_{3y}^2(t) \end{vmatrix} \end{aligned}$$

$$\begin{vmatrix} W_{4x}^2(t) & 1 & W_{4y}^2(t) \\ W_{5x}^2(t) & 1 & W_{5y}^2(t) \\ W_{6x}^2(t) & 1 & W_{6y}^2(t) \end{vmatrix} = \eta_1(t) + \eta_2(t) - 2\eta_3(t) \quad (5)$$

同理, $\eta'_{2,3,4,5,6,7}(t) = \eta'_1 + \eta'_2 - 2\eta'_3 = (\det(A))^4 \eta_{2,3,4,5,6,7}(t)$, 为了消去这个因子 $\det(A)$, 定义绝对仿射不变量:

$$I = \frac{\eta'_{1,2,3,4,5,6}(t)}{\eta'_{2,3,4,5,6,7}(t)} = \frac{\eta_{1,2,3,4,5,6}(t)}{\eta_{2,3,4,5,6,7}(t)} \quad (6)$$

小波变换最多可以把信号分解 $\log_2 N$ 层 (N 是采样点的个数), 所有分解层上的系数完全刻画了原始信号的特征^[5]。但不同的物体在某一分解层上可能有相同的系数, 因此用更多的层来推导仿射不变量, 可以提高物体识别率。但是分解层数过多, 会带来很大的计算量。文中对建筑物轮廓进行仿射变换, 使用的是六层仿射不变量, 它既满足了对识别率的要求又不会带来过多的计算量, 是比较适合的。

3 建筑物模型数据库

在卫星地图中, 屋顶是建筑物的一个最重要的特征, 通过检测屋顶边缘可以检测到建筑物, 所以文中通过检测屋顶边缘来识别建筑物。分析 Google Earth 卫星地图, 可以将屋顶大致分为两类: 平滑无坡度的屋顶; 有坡度的屋顶。

对于平滑无坡度的屋顶可将其分为 I 型、 T 型、 U 型、 L 型等, 这类屋顶具有相对简单、形状规整、较对称、共心等特性; 对于有坡度的屋顶, 可将其分成单倾角、双倾角和四倾角等。当然, 也有一些屋顶是以上几种类型的组合型。

对于单倾角屋顶来说, 它在卫星遥感图片中的图像类似于平滑无坡度屋顶。对于双倾角屋顶来说, 在边缘提取的时候有两种不同情况: 第一种是一个矩形代表了整个屋顶; 另一种是一个矩形仅仅代表了光照的一面。对于四倾角屋顶来说, 情况就更为复杂了。由于倾斜度不同, 光照角度不一, 图像拍摄角度各异, 会导致产生各种不同的光照区域和阴影区域。而屋脊和房屋边缘在区分光照部分和阴影部分起到了非常重要的作用。通过分析四倾角屋顶模型, 可以将其分解

成图 1a, 并得到两种典型的模型(如图 1b 所示)。

最后, 通过分析卫星地图结合房屋设计基本原则, 建立起屋顶模型数据库, 如图 2 所示。

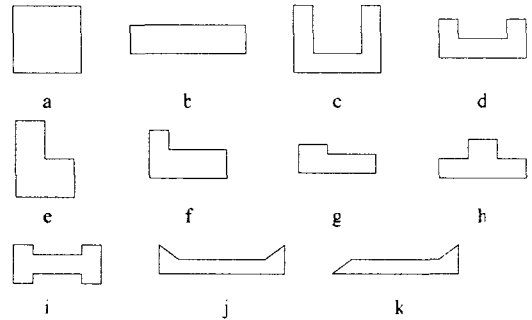


图 2 建筑物模式数据库

4 实验

4.1 实验步骤

为了验证文中所提方法的正确性, 设计了一个测试系统。实验所用微机配置如下: Intel Pentium 2.2GHz, 512M RAM, Windows XP Professional, C#。卫星地图来源于 Google Earth。实验数据选用了 10 幅 Google Earth 地图图像。具体实验步骤如下:

(1) 构建的小波填充数组检测建筑物边缘, 其中:

$$h = \{0, 0, 0.125, 0.375, 0.125, 0\}$$

$$g = \{0, 0, 0, -2.0, 2.0, 0, 0\}$$

$$l = \{0.0078125, 0.046875, 0.1171875, 0.65625, 0.1171875, 0.046875, 0.0078125\}$$

首先由公式(1) ~ (3) 得到平滑图像 $S_2 f(x, y)$, 垂直方向 $W_2^1 f(x, y)$ 和水平方向 $W_2^2 f(x, y)$, 然后计算梯度向量模型(公式(4)) 来得到建筑物的轮廓, 最后利用跟踪算法得到封闭曲线。

(2) 选择和优化建筑物边缘。

(3) 计算封闭曲线的弧长和质心坐标 (x_0, y_0) 。

$$x_0 = \frac{\sum_{i \in L} x_i}{n}, y_0 = \frac{\sum_{i \in L} y_i}{n}$$

x_i, y_i 代表封闭曲线 L 上点的水平和垂直坐标, n 代表封闭曲线上点的个数。然后通过计算 $x'_i = x_i - x_0, y'_i = y_i - y_0$ 对曲线上的所有点作相对坐标变换。

(4) 计算边缘上的点与质心之间的距离, 找到最近的点, 记录并标记下来。在水平方向上, 从起始点开始, 延顺时针方向找到最近的点, 记录下这个点的坐标, 以这个点为新的起始点, 重复以上步骤, 直到回到第一个起始点为止。

(5) 对于所有被标记的点的坐标, 用二进小波做分解, 记录每层的分解结果。小波填充数组是:

$$h = \{0.1629, 0.50547, 0.4461, -0.01979,$$



图 1 四倾角屋顶分解法

$-0.13225, 0.02181, 0.023252, -0.00749\}$
 $g = \{-0.00749, 0.023252, -0.13225, 0.4461,$
 $-0.01979, 0.02181, 0.50547, 0.1629\}$

(6) 通过公式(5)、(6) 得到仿射不变量, 再与图 3 中屋顶模型的仿射不变量做比较, 文中定义绝对差不大于 0.1 且最小者即匹配。

4.2 实验结果

图 3 是检测到的建筑物边缘轮廓曲线图, 表 1 列出了计算得到的每个轮廓相对应的仿射不变量, 它们与数据库中建立的建筑物模型的仿射不变量相比较, 最后得到相匹配的模式。

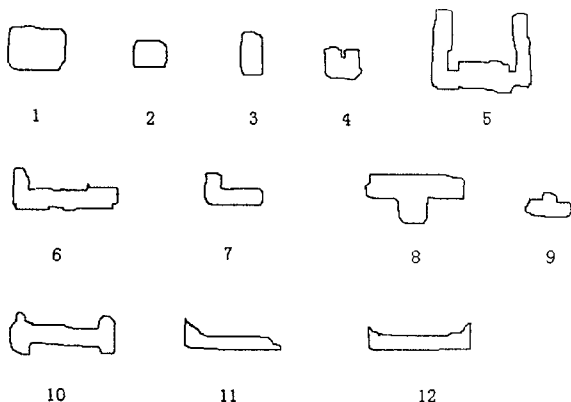


图 3 检测到的建筑物边缘轮廓曲线

从实验结果中可以看出, L 型屋顶具有较高的识别率。通过轮廓 4 可看出矩形屋顶虽然可能由于植被等因素检测出来的形状与 U 型屋顶相似, 但通过仿射不变量计算仍然与矩形模式 a 相匹配, 这说明了仿射不变量的稳定性。虽然并没有从卫星地图中得到太多的 I 型, T 型和四倾角屋顶, 但从表 1 的结果看来本方法还是很有效的。

5 结束语

有效地识别和提取卫星遥感地图中的建筑物有助于推动卫星遥感地图在城市仿真、城市规划等领域的应用。针对该问题, 提出了一个新的基于小波变换的卫星遥感地图的建筑物识别方法。首先利用二进小波

提取边缘; 然后, 通过优化处理和跟踪算法得到封闭曲线后对每个建筑物的轮廓分别计算基于小波的仿射不变量; 最后构建了一个建筑物识别模式数据库, 通过对检测到的建筑物轮廓和数据库中构建的建筑物轮廓的仿射不变量作比较, 得到相匹配的模式。实验结果表明所提方法能够准确有效地识别卫星遥感地图中的建筑物。

下一步的工作将在所提方法的基础上继续提高建筑物识别率及精度, 同时不断完善建筑物模型数据库。

表 1 实验结果

轮廓及仿射不变量	轮廓 1 0.34704	轮廓 2 0.33901	轮廓 3 0.23921	轮廓 4 0.33863
匹配结果	模式 a 0.34321	模式 a 0.34321	模式 b 0.23205	模式 d 0.34321
轮廓及仿射不变量	轮廓 5 0.52626	轮廓 6 0.41813	轮廓 7 0.40910	轮廓 8 0.30023
匹配结果	模式 c 0.51686	模式 f 0.42256	模式 g 0.40539	模式 h 0.29901
轮廓及仿射不变量	轮廓 9 0.29019	轮廓 10 0.28393	轮廓 11 0.26572	轮廓 12 0.24788
匹配结果	模式 h 0.29901	模式 i 0.27302	模式 k 0.25980	模式 j 0.24988

参考文献:

- [1] Shufelt J. Performance Evaluation and Analysis of Monocular Building Extraction from Arial Image[J]. IEEE Trans. Pattern Analysis and Machine Intelligence, 1999, 21(4): 311 - 317.
- [2] Tao Wenbing, Liu Jian, Tian Jinwen. A New Approach to Extract Rectangle Building Automatically from Aerial Images [J]. Chinese Journal of Computers, 2003, 26(7): 866 - 873.
- [3] Yang Yijun, Zhao Rongchun, Wang Wenbing. Automatic Building Detection in Aerial Image [J]. Computer Engineering, 2002, 28(8): 102 - 105.
- [4] Weiss I. Geometric Invariants and Object Recognition [J]. International Journal of Computer Vision, 1993, 10(3): 207 - 211.
- [5] Khalil M L, Bayoumi M M. A Dyadic Wavelet Affine Invariant Function for 2D Shape Recognition [J]. IEEE Trans. Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2001, 23(10): 1152 - 1164.

(上接第 242 页)

- ulation for Emergency Management Track. San Diego: [s. n.], 1994.
- [2] Guerrier P, Serodes J. Canadian expert systems for technological accidents preparedness and response [C]//Proceedings of the 1995 10th International Conference on Applications of Artificial Intelligence in Engineering. Udine, Italy: Computational Mechanics Inc, 1995.
- [3] Gheorghe A V, Vamanu D. Pilot decision support system for nuclear power emergency management [J]. Safety Science, 1995, 20(1): 13 - 26.
- [4] 李 巍. 基于案例推理的预案信息系统研究 [D]. 上海: 同济大学, 2000.
- [5] 刘义刚. 基于预案库的快速智能决策支持系统的研究 [D]. 北京: 北京理工大学, 2001.