

# 基于足迹图模型的立体路网提取

何楚<sup>1,2</sup>, 杨芳<sup>1</sup>, 石博<sup>1</sup>, 徐新<sup>1</sup>, 廖明生<sup>2</sup>

(1. 武汉大学电子信息学院, 430072 武汉; 2. 测绘遥感信息工程国家重点实验室, 430072 武汉)

**摘要:** 为了改善足迹跟踪算法在夹角较小的交叉路口容易出现将两足尖合并和不易检测波谷的问题, 提出了一种新的立体路网提取算法. 算法分为3个步骤: 首先用足迹跟踪算法提取道路基元, 然后在足迹图结构上建立道路模型, 最后通过立体反演层次推理实现道路分层. 结果表明: 该算法通过对波峰合并的角度选择和波谷检测的偏差校正提高了道路基元提取的准确性, 并结合立体反演推理算法实现了道路连接、高度设置和分层. 最后在 Google Earth 提供的真实数据上进行实验验证了该算法能有效地体现立体交叉路口的层次, 并能保证提取出来的道路的正确性、完整性.

**关键词:** 足迹跟踪; 立体路网; 交叉路口; 道路提取; 层次推理

中图分类号: TP75

文献标志码: A

文章编号: 0367-6234(2013)10-0111-07

## Stereoscopic road network extraction based on footprint graph model

HE Chu<sup>1,2</sup>, YANG Fang<sup>1</sup>, SHI Bo<sup>1</sup>, XU Xin<sup>1</sup>, LIAO Mingsheng<sup>2</sup>

(1. Electronic Information School, Wuhan University, 430072 Wuhan, China;

2. The State Key Laboratory for Information Engineering in Surveying, Mapping and Remote Sensing, 430072 Wuhan, China)

**Abstract:** A new three-step method called stereoscopic intersection extraction based on footprint graph model is proposed in this paper. Firstly, the primitives are extracted by footprint, then the road model is built based on the graph of primitives, finally, the road lamination is realized by referring and reasoning. Though the footprint algorithm presented by Hu can be used to extract road primitives, there exist two problems, one is that two toes which are adjacent can be easily considered as one toe, and the other is that troughs are not likely to be detected, we solved these two problems by making some improvements. Then we use stereoscopic inferring algorithm to link the roads, set the heights of the roads and realize lamination. At last, we experiment on the dataset of Google earth, as a result, this algorithm can reflect the levels of the roads effectively, what's more, the correctness being guaranteed, this algorithm still has strong robustness.

**Key words:** footprint; stereoscopic road network; intersection; road extraction; level inference

随着城市化进程的不断推进, 城市地上与地下的交通设施日益发达, 提供快速准确的路径规划与导航成为智能交通和应急管理等领域迫切需要解决的关键问题<sup>[1]</sup>, 人们对道路与交通的认识也从传统的二维平面转向了立体路网. 目前, 立体

路网提取的研究已成为道路提取的研究热点之一. 由于道路提取应用条件的多样性, 道路提取的分类方法也是多样的<sup>[2-6]</sup>, 道路提取根据是否有人工参与可以分为全自动和半自动道路提取<sup>[7]</sup>. 全自动道路提取的方法不需要人机交互过程, 只需要给定初始点和初始方向利用跟踪的方法提取道路. 全自动道路提取算法的复杂之处在于它是多种算法的综合应用, 包括多尺度多分辨率、统计学习和几何概率模型等. 半自动法通过人工播种一系列分散的种子点, 通过主动轮廓模型<sup>[8]</sup>、模拟退火<sup>[9]</sup>和动态规划<sup>[10]</sup>等方法提取道路中心线. 本文的工作不仅是提取道路, 而且还要对提取出的道路进行分层, 半自动提取的可操作性和可行

收稿日期: 2012-11-26.

基金项目: 国家重点基础研究发展计划项目(2013CB733404);  
国家自然科学基金资助项目(41371342, 61331016);  
中国博士后科学基金资助(2011118);  
中国博士后科学基金特别资助(2012T50671).

作者简介: 何楚(1974—), 男, 副教授;  
徐新(1967—), 男, 教授, 博士生导师;  
廖明生(1962—), 男, 教授, 博士生导师.

通信作者: 何楚, chuhe@whu.edu.cn.

性远大于全自动道路提取<sup>[11-12]</sup>,因此先选择半自动的足迹跟踪算法提取道路,该算法由 Hu 等<sup>[13]</sup>提出,但算法存在两个问题,第一是交叉口的两支路夹角较小时,容易将两支路合并为一个,其次是不易检测到波谷.针对这两个问题,本文作了两点改进,首先不是直接保留峰值大的那一个,而是保留角度最合适的波峰;其次波谷检测时,不仅考虑两个波峰之间所有距离的均值,还考虑它们的偏差.提取出道路之后,根据三维推理算法建立道路之间的连接,并且对连接后的道路进行分层.本文主要针对 Hu 等提出的基于路足迹跟踪的道路提取算法在确立波峰和波谷方面的不足之处提出了两点改进,在道路提取的基础之上根据设定的高度进行三维道路推理,显示出道路的层次.本算法在 Google earth 的真实数据上进行实验,获得了令人满意的结果.

### 1 道路基元提取

在航空图像中,道路是细长线性结构,道路的路宽在一定的范围内是一定的,并且道路与其周围的环境有明显的对比<sup>[14-15]</sup>,因此,可以通过跟踪道路足迹来提取道路.人工选择种子点,以此点为中心可以生成一个辐射半径相同,辐射角度相同的同自行车轮状的幅轮,由于道路的同质性,每一个辐条在道路与非道路的交界处会产生一个断点,将这些断点依次连接起来形成的不规则形状即该种子点的足迹.各个断点距离公共起点即种子点的距离不一样,能够确定道路的方向,每个方向称为足尖.足尖的中点为节点,记为  $v_i$ .以种子点为根节点沿着足尖的方向生长出来的树即为道路  $R$ ,将种子点与节点依次按顺序连接起来,连接两点之间的边记为  $E_i, G_i = (V_i, E_i)$  为一个道路子图,所有子图的集合  $G$  包含一幅图像中所有的道路.

#### 1.1 足尖寻找算法

将足迹上的各个断点的角度及其到中心点的距离分别设为横、纵坐标,可以得到一个波形图,波形图的波峰波谷位置指明了足迹的方向等信息.实现足迹跟踪的关键是找到足迹的足尖.足尖寻找算法包括以下 4 个步骤.

**步骤 1** 寻找所有波峰.如果一个断点到起点的距离大于与其相邻的断点到起点的距离,则将其视为一个波峰,波峰可以表示为

$$\delta(i) > \delta((i - 1 + 4n) \bmod(4n)),$$

$$\delta(i) > \delta((i + 1) \bmod(4n)).$$

其中:  $\delta(\cdot)$  表示到足迹中心点的距离,  $\bmod$  表示

模运算.

**步骤 2** 去除小波峰. 设最大的波峰为  $\delta_{\max}$ , 将前面所取小波波峰与之比较,如比值小于判定阈值  $\varepsilon_1$ ,则将其去除,计算式为

$$\frac{\delta(i)}{\delta_{\max}} < \varepsilon_1.$$

**步骤 3** 合并相邻波峰. 对于两个波峰  $i$  和  $j(j > i)$ , 如果满足

$$|j - i| < \varepsilon_2, \text{ 或 } |4n - j + i| < \varepsilon_2 \sqrt{b^2 - 4ac},$$

则只保留峰值较大的波峰,即

$$\delta(k) = \max\{\delta(i), \delta(j)\}, k = i \text{ 或 } j.$$

**步骤 4** 去除不明显的波谷. 如果两个波峰之间的波谷不明显,则去除其中一个. 假设  $\delta_{\text{avg}}$  表示波峰  $i$  和  $j$  之间的断点到起点的距离的均值,即

$$\delta_{\text{avg}} = \frac{\sum_{k=i}^{k=j} \delta(k)}{j - i + 1}.$$

若

$$\frac{2\delta_{\text{avg}}}{\delta(i) + \delta(j)} > \varepsilon_3,$$

则认为这个两个波峰之间的波谷不明显,需要移除峰值较小的一个. 其中,  $\varepsilon_1, \varepsilon_2, \varepsilon_3$  为常数, 设  $\varepsilon_1 = 0.25, \varepsilon_3 = 0.8, \varepsilon_2 = 0.125$ .

#### 1.2 贝叶斯决策裁剪

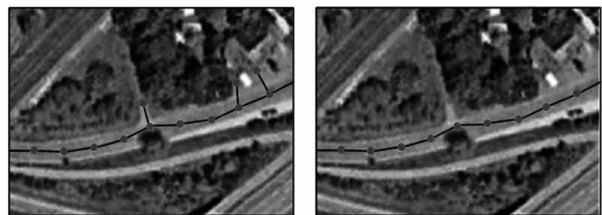
对于足尖的足迹,有一个近似的结论:面积与周长比 ( $A/P$ ) 近似等于道路宽度的一半,因此可以通过  $A/P$  值来代替道路宽度作为观测数据进行贝叶斯判断.

用  $w$  (二进制) 表示节点是否为道路, 设  $w = 1$  表示节点为路上的点, 可通过比较  $p(w = 1 | d)$  和  $p(w = 0 | d)$  决定  $w$  的值. 如果  $p(w = 1 | d) > p(w = 0 | d)$ , 则为道路. 贝叶斯方程为

$$p(w | d) = \frac{p(d | w)P(w)}{p(d)},$$

$$p(d) = \sum_{w \in \{0,1\}} p(d | w)P(w).$$

通过  $p(w | d)$  和  $P(w)$  得到后验概率后再对节点进行判断. 图 1 展示了树裁剪前后的结果.



(a) 未裁剪的道路 (b) 裁剪后的道路

图 1 树裁剪过程

## 2 改进的足迹跟踪算法

Hu 等<sup>[13]</sup>提出的足迹跟踪算法有些不足,主要体现在足尖寻找算法上:1) 寻找足尖时,当交叉口的两支路夹角较小时,容易将两支路合并为一个,原因是若满足  $|j-i| < \varepsilon_2$  或  $|4n-j+i| < \varepsilon_2$ , 则进行合并,但实际情况中当交叉路口夹角  $\theta$  较小时,容易将两条岔路合并,对此本文作了些改进,即在波峰合并时,当  $\theta(i,j) < \theta_s$  时,且满足  $|j-i| < \varepsilon_2$  或  $|4n-j+i| < \varepsilon_2$  时,才对两个波峰进行合并,其中  $\theta(i,j)$  表示波峰  $i$  和  $i$  与中心连线的夹角,  $\theta_s$  为最小夹角阈值,一般设为检测图像中最小的交叉路口夹角,这样就可以避免在角度较小的交叉路口出现漏检。2) 检测波谷时,只依据两个波峰之间所有断点到中心点的距离的均值来判断,当两支路的夹角较小时,均值一般较大,不容易检测到波谷,而原算法没有检测到波谷时,则将两波峰合并,因此容易将两支路合并为一个。

针对以上问题,在进行波峰合并时,不是直接保留峰值大的那一个,而是在合并多个相邻的波峰中,保留角度最合适的波峰。假设有多个按角度排序的波峰  $P$ , 其中任意相邻的波峰  $i$  和  $j(j > i)$ , 满足  $\delta(k) = \max\{\delta(i), \delta(j)\}$ , 则只保留其中角度与其他波峰相差最小的一个,即

$$k = \operatorname{argmin}_{i \in P} \left\{ \sum_{j \in P, j \neq i} |i-j| \right\}.$$

波谷检测的问题,改进算法不仅考虑两个波峰之间所有距离的均值,还考虑它们的偏差,如果均值大于某个值且偏差较小,则移除其中一个波峰。偏差  $e$  采用绝对值误差表示为

$$e = \sum_{k=i}^j |\delta(k) - \delta_{\text{avg}}|.$$

当  $e > \varepsilon_4$  时,则认为波峰  $i$  和  $j$  之间存在波谷。图 2 给出了改进前算法和改进后算法的效果比较,可以看到,改进后的算法能很好地解决前面提到的两个问题。图 2(a)~2(c) 为合并波峰步骤改进前后的结果,图 2(d)~2(f) 为检测波谷步骤改进前后的结果,中间的圆点表示足迹中心,周圆的点及曲线表示波峰。

## 3 三维路网推理及提取

### 3.1 三维路网图模型构造

$P_i$  为第  $i$  次迭代之后的候选道路,  $G_i = (V_i, E_i)$  为第  $i$  次迭代节点  $V_i$  和边  $E_i$  组成的图。每个  $v_j \in V_i$  都有两种状态,分别标记为 alive 和 dead。当节点  $v_j$  的状态为 alive 时,计算它的足迹并根据

足尖寻找算法找到它所有的足尖。由于在  $E_i$  中有一条确定的边连接  $v_j$  与其在  $V_i$  中的父节点,那么在这条边所指的方向至少有一个足尖。设  $t(t \geq 1)$  为节点  $v_j$  的足迹的足尖个数。每个足尖决定了一个方向并且产生新的节点  $v_k$  (位于足尖的中点) 和新的边  $e_k = (v_j, v_k)$ ,  $1 \leq k \leq t$ 。当  $t > 1$  时,  $V_{i+1} = V_i \cup \{v_k\}$ ,  $E_{i+1} = E_i \cup \{e_k\}$ 。树  $T_i$  扩展为  $T_{i+1} = (V_{i+1}, E_{i+1})$ , 对于每个新节点  $v_k$ , 若  $v_k \in P_i$ , 则  $v_k$  状态为生 (alive), 否则为死 (dead)。以状态为 alive 的节点去继续往下搜索,直至树上的所有的点都为 dead。

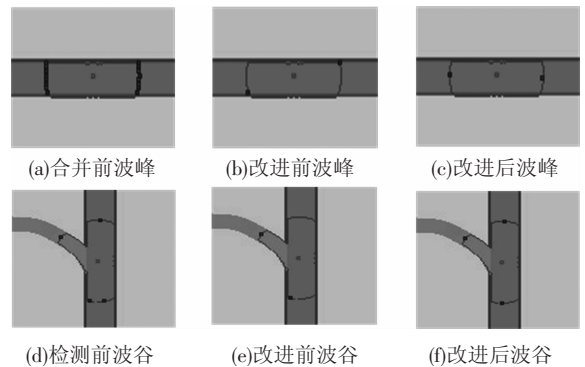
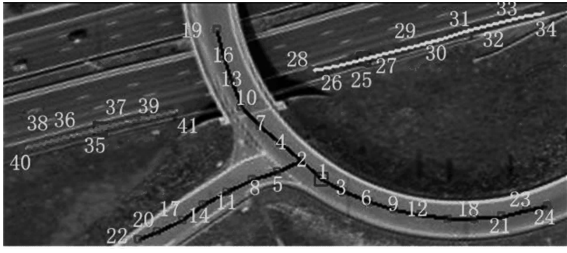


图 2 改进前后的算法效果对比

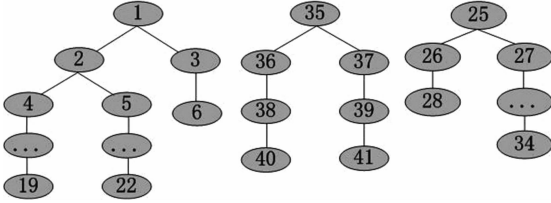
本文将由一个种子点产生的状态为 alive 的节点依次连接起来,连接后的节点形成一幅子图,一幅道路图像中至少可以产生一幅这样的图,如图 3(a) 所示,节点 1、25、35 分别为种子点,图模型按照种子点延足尖的方向生长,直至节点状态变为 dead,即往下搜索不到满足要求的节点停止。图 3(b) 为道路图模型。图 3(c)、3(d) 分别为经过立体反演推理和节点连接之后的图结构和图模型。

### 3.2 基于图模型推理的三维路口提取

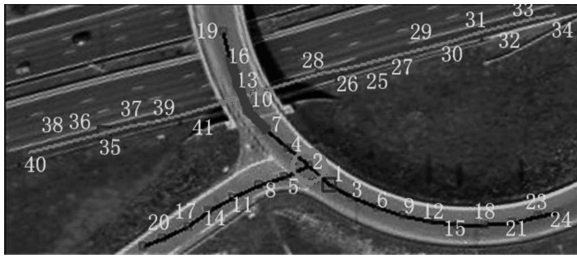
图 4 给出了三维道路交叉路口的提取流程:首先通过足迹跟踪算法得到多棵跟踪树,然后通过三维推理算法将跟踪树合并并设置高度信息,最后实现三维可视化。其中三维推理主要是通过道路边缘之间的相交、相连等关系判断道路之间的层次。而足迹跟踪算法也是利用道路的边缘信息获得道路的中心线,因此,可以将这两者结合,得到道路交叉路口的三维推理算法。由于基本无法从二维图像获得高度信息,因此在三维推理过程中,主要目标是体现道路之间的层次关系。道路的初始化高度都为零,推理过程中,两条被高层道路压住的道路连接起来之后,可以对高层道路最高点的高度进行设置,然后从最高点高度依次递减,直至道路高度为 0。



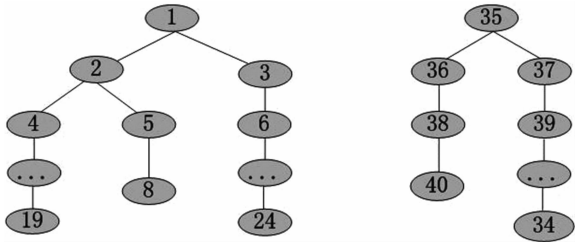
(a) 图结构的产生与节点标注



(b) 道路图模型



(c) 连接后的图结构



(d) 连接后图模型

图 3 对所有图进行节点标注

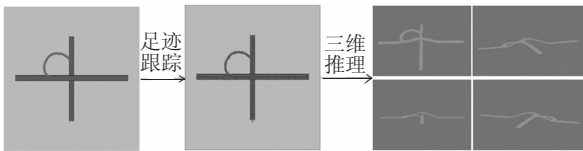


图 4 三维推理流程图

经过足迹跟踪后得到的所有道路子图  $G_i$  组成图  $G$ , 基于足迹跟踪的三维推理算法具体实现如下。

计算  $G$  中任意两个叶子节点 (设其分别为  $l_1$  和  $l_2$ ) 的中点  $m_{mid}$  到道路边缘的距离

$$L(m_{mid}) = (L(l_1) + L(l_2))/2.$$

其中:  $L$  函数表示某节点到道路边缘的距离。

在图  $G$  中找到与  $m_{mid}$  相近的两个节点  $pre$  和  $next$ , 方法是以  $G$  中每个子图的根节点, 即种子点  $P$  为开始,  $a$  为点  $P$  到中点  $m_{mid}$  的距离,  $b$  为  $P$  的孩子节点  $P_{child}$  和中点  $m_{mid}$  之间的距离,  $c$  为  $P$  与

$P_{child}$  的距离, 若  $|a + b - c|$  大于设定的阈值  $\min_{Distance}$ , 则继续遍历其余节点,  $P$  与  $P_{child}$  也依次更替, 若第 1 幅图遍历完没有找到小于阈值的点, 则遍历第 2 幅, 方法同上, 直至所有的子图都遍历完全。当找到满足条件的节点时, 则有  $pre = node$ ,  $next = node.child$ 。

$$pre = \underset{p \in F}{\operatorname{argmin}} \{ \| p_{vertex} - mid \| + \| p_{parent.vertex} - mid \| \},$$

$$next = pre_{child}.$$

根据面积周长比估计节点的路宽

$$w = pre.apr + next.apr.$$

计算当前节点  $p_{pre}$  和下一节点  $p_{next}$  处的路的方向

$$\begin{cases} \theta_1 = \Phi(\operatorname{vertex}(p_{pre}), \operatorname{vertex}(p_{pre.child})) \\ \theta_2 = \Phi(\operatorname{vertex}(p_{next}), \operatorname{vertex}(p_{next.parent})) \end{cases}$$

估计两个叶子节点是否能够连接,

$$E_{eva} = eva_{pos} * eva_{width} * eva_{dir}.$$

其中:  $eva_{pos} = \min(1, w_{wid}/d_{dis})$ ,  $w_{wid}$  表示宽度,  $d_{dis}$  表示距离将  $l_1$  和  $l_2$  两个节点路宽的一半之和与两节点之间的距离相比较, 若路宽之和比节点距离大, 则  $eva_{pos}$  的值为 1, 反之, 则为路宽和与节点距离之商。

$$eva_{width} = \min(l_{1,apr}/l_{2,apr}, l_{2,apr}/l_{1,apr})$$

将  $l_1$  和  $l_2$  的路宽相除, 若  $l_1$  的路宽大于  $l_2$  的路宽, 则  $E_{eval}$  的值为  $l_{1,apr}/l_{2,apr}$ , 反之则为其倒数。

$$eva_{dir} = 1 - \min\{ |\theta_1 - \theta_2| / (\pi/2), \pi - |\theta_1 - \theta_2| / (\pi/2) \}.$$

判断  $p_{pre}$  和  $p_{next}$  所在的道路的角度, 将它们的角度之差与  $(\pi/2)$  进行比较。当得到的  $eval$  值大于给出阈值, 实验中设定的阈值为 0.1, 则认为两个叶子节点  $l_1$  和  $l_2$  的连接可以接受。

层次体现,  $l_1$  与  $l_2$  相连接以后, 对  $p_{pre}$  和  $p_{next}$  进行操作。先对  $p_{pre}$  点进行操作, 设其高度为 3, 其父节点的高度值依次减 1, 直至高度为 0。再对  $p_{next}$  点进行操作, 同样  $p_{next}$  的高度也设为 3, 其子节点的高度值依次减 1, 直至高度为 0。这样立交桥的高度信息即体现出来, 并且可以分层。本文将高度为 3 的节点与其子节点和父节点的连线设为深灰色, 分层结果如图 5 所示。

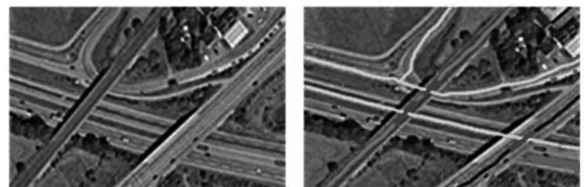


图 5 分层结果示意图

## 4 实验

本文实验原始数据是从 Google earth 上截取的一些道路场景, 这些道路具有一定的代表性. 图 6 为 4 组原始数据、Stereoscopic 地面参照图 (Ground truth, GT) 和人工标注 GT 图, 其中第 1 列为原始数据, 第 2 列为 Google Sketch up 手工标注的 Stereoscopic GT 图, 第 3 列为用 Photoshop 软件进行标注的 GT 图.

本文在基于足迹跟踪的道路提取算法上面进行了三维道路推理, 为证明算法的有效性, 在 Google earth 的截图上进行了实验. 足迹跟踪提取道路时, 本文对辐轮进行初始化, 设置一个辐轮的辐条数为 100 条, 辐条长度为 35 个像素. 实验过程中, 这两个参数是可以修改的.

实验的评测方法: 先统计交叉口的数目并且统计每个交叉口的类型, 路口类型有交叉、连接两种. 实际检测是基于足迹跟踪算法的三维交叉路口提取的结果, 将统计出来的结果记录混淆矩阵

中, 其中混淆矩阵的列表示真实节点类型数量, 行表示这个节点检测出来的类型. 表 1 按照评测方法列出了实验结果.

由表 1 可以看出, 基于路足迹跟踪的三维交叉路口的提取, 从判断上下层交叉路口的结果看来, 算法的平均准确率可以达到接近 100%, 判断相连接路口的准确率也可以达到 82.1%. 根据道路的特性, 两个叶子节点在一条道路上, 则这两个点所能提供的道路宽度应该大致相同, 而且这两个点所在道路的曲率也不会相差很大, 并且这两个点之间的距离与路宽之差也应该在一个很小的范围之内. 正是由于道路的这几个特点, 使得本文在判断是否应该连接上有了自己的原则, 道路连接的准确率才可以达到接近 100% 的程度. 然而在判断相连接交叉路口的问题上, 精度却没有判断分层的精度高, 从图 7 中 4 组数据的结果可以看出, 道路结构太复杂, 路上障碍物过多时, 道路的像素值受到影响, 在判断的时候就会导致误判或者漏判.

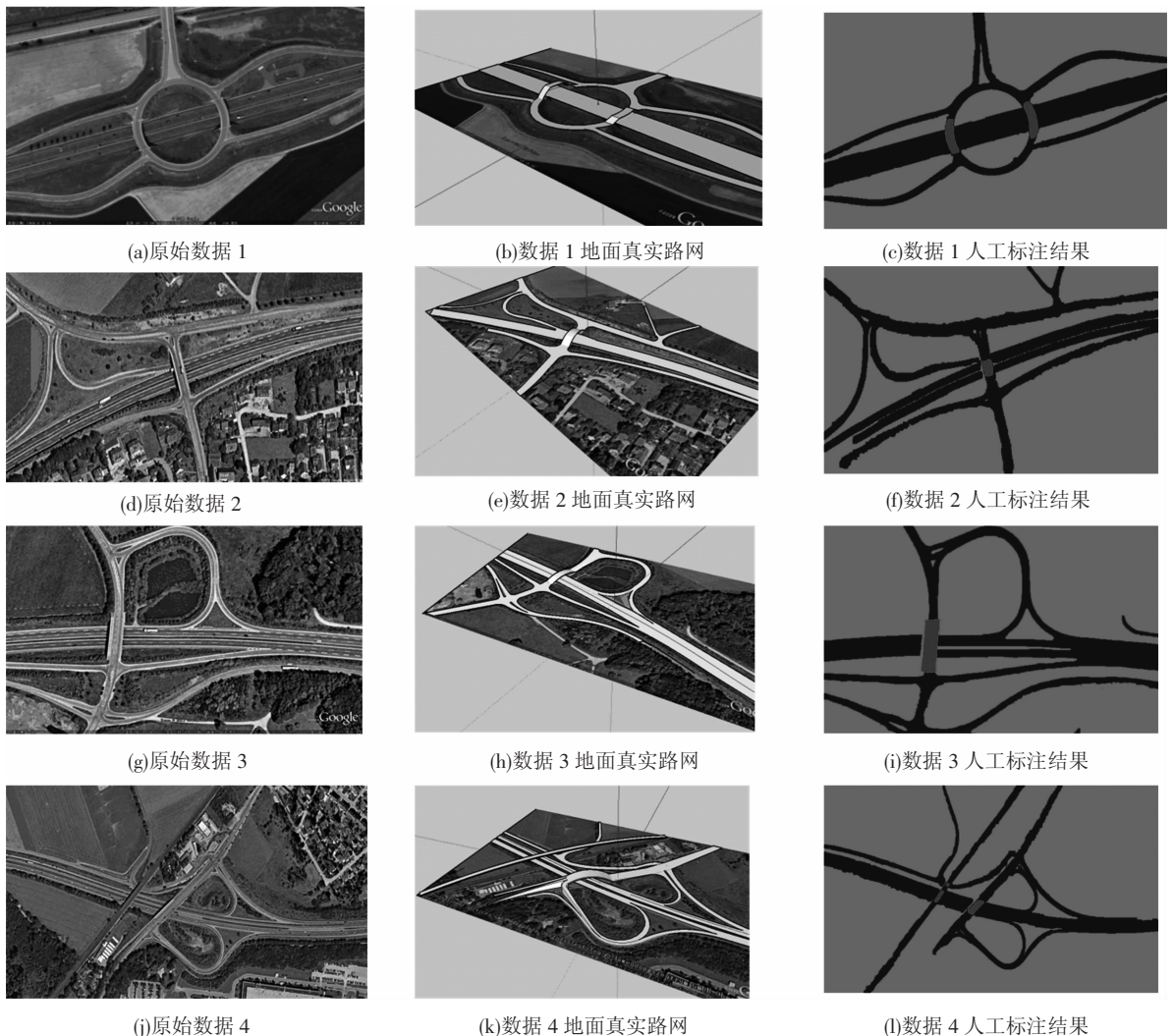


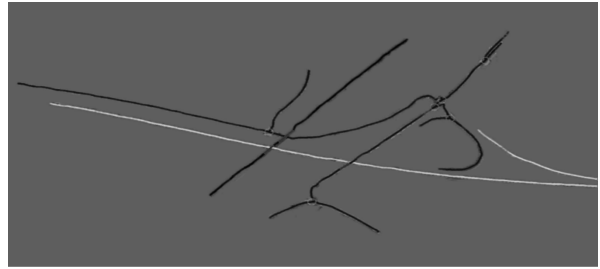
图 6 原始数据及 GT

表 1 基于交叉和连接的路口数进行统计的实验结果

原始数据	类别	实验检测 交叉点数/个	实验检测连接 点数/个	实验未检测 连接点数/个	算法正 确率/%
1	实际交叉点	3	0	0	100.0
	实际连接点	0	6	4	60.0
2	实际交叉点	2	0	0	100.0
	实际连接点	0	6	0	100.0
3	实际交叉点	2	0	0	100.0
	实际连接点	1	5	0	86.7
4	实际交叉点	2	0	0	100.0
	实际连接点	0	7	2	77.8



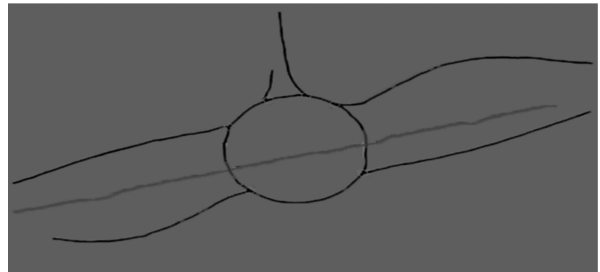
(a) 数据 1 实验结果



(b) 数据 1 去除背景后的道路



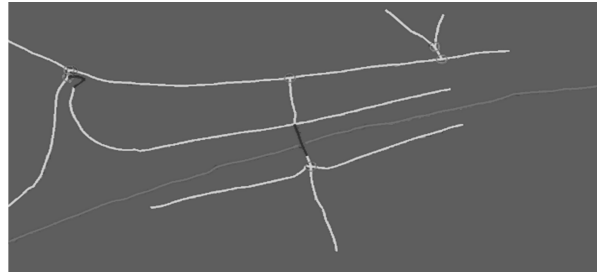
(c) 数据 2 实验结果



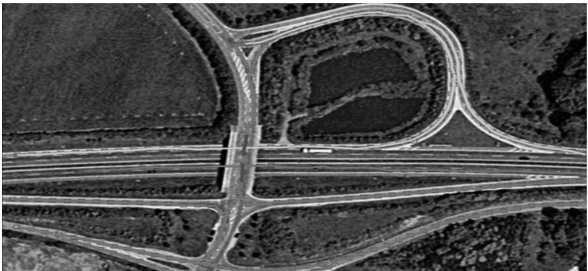
(d) 数据 2 去除背景后的道路



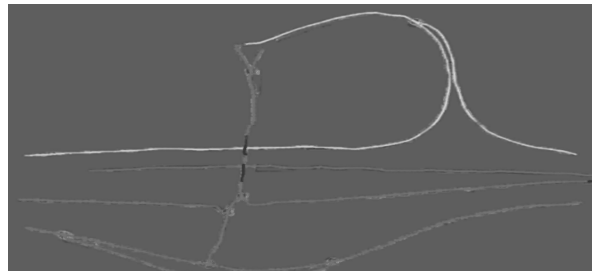
(e) 数据 3 实验结果



(f) 数据 3 去除背景后的道路



(g) 数据 4 实验结果



(h) 数据 4 去除背景后的道路

图 7 各数据实验结果

## 5 结 论

1)提出了一种基于改进的足迹跟踪道路检测算法,针对 Hu 等提出的基于路足迹跟踪的道路提取算法在确立波峰和波谷方面的不足之处提出了两点改进。

2)在提取道路的基础之上,提出了针对城市立交桥三维交叉路口提取算法,并在提取出来的道路上设置高度信息,体现出道路的层次。

3)实验结果表明,基于足迹跟踪算法的三维道路提取方法可以在保证较高正确率的情况下显示道路层次。进一步工作是改进和优化该算法并将其应用于 3 层的立交桥、地下隧道及过江隧道的提取中。

## 参考文献

- [1] 朱庆,李渊. 道路网络模型研究综述[J]. 武汉大学学报:信息科学版,2007, 32(6): 471 - 476.
- [2] MENA J B. State of the art on automatic road extraction for GIS update: a novel classification [J]. Pattern Recognition Lett, 2003, 24 (16): 3037 - 3058.
- [3] SHI W Z, ZHU C, WANG Y. Road feature extraction from remotely sensed image[J]. Review and Prospects Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2001, 30(3): 257 - 262.
- [4] TOUZI R, LOPES A, BOUSQUET P. A statistical and geometrical edge detector for SAR images [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 1988, 26(6): 764 - 773.
- [5] ADAIR M, GUINDON B. Statistical edge detection operators for linear feature extraction in SAR images [J]. Canadian Journal of Remote Sensing, 1990, 16 (2): 10 - 19.
- [6] OLIVER C J. Edge detection in SAR segmentation [C]//Proceedings of the Conference on SAR Data Processing for Remote Sensing 1994. Rome, Italy:

SPIE, 1994: 80 - 91.

- [7] GRUEN A, LI H. Semi-automatic linear feature extraction by dynamic programming and LSB-snakes [J]. Photogrammetric Engineering & Remote Sensing, 1997, 63(8), 985 - 994.
- [8] 吴亮,胡云安. 遥感图像自动道路提取方法综述[J]. 自动化学报, 2010, 36(7): 912 - 922.
- [9] TRINDER J C, MAULIK U, BANDYOPADHYAY S. Semi-automated feature extraction using simulated annealing[J]. International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing, 2000, 33: 905 - 911.
- [10] MERLET N, ZERUBIA J. New prospects in line detection by dynamic programming [J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 1996, 18(4): 426 - 431.
- [11] ZHANG C, BALTSAVLAS E. Knowledge-based image analysis for 3D edge extraction and road reconstruction [J]. International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing, 2000, 33: 1008 - 1015.
- [12] GRUEN A, LI H. Extraction of 3D linear feature from multiple images by LSB-snakes [J]. Proc SPIE, 1997, 3115: 119 - 130.
- [13] HU J, BAZDAN A, FEMIANI J C, *et al.* Road network extraction and intersection detection from aerial images by tracking road Footprints [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2007, 45(12): 2007.
- [14] STEGER C, GLOCK C, ECKSTEIN W, *et al.* Model-based road extraction from images [C]//Proceedings of the International Workshop on Automatic Extraction of Man-Made Objects from Aerial and Space Images. Basel, Schweiz: Springer, 1995: 275 - 284.
- [15] BARZO HAR M, COOPER D B. Automatic finding of main roads in aerial images by using geometric-stochastic models and estimation [J]. IEEE Trans Pattern Anal Machine Intell, 1996, 18(7): 704 - 721.

(编辑 魏希柱)