

文章编号: 1001-1595(2011)01-0125-07

基于有向属性关系图的典型道路交叉口结构识别方法

徐柱¹, 蒙艳姿², 李志林³, 李木梓¹

1. 西南交通大学 测量工程系, 四川 成都 610031; 2. 四川省遥感信息测绘院, 四川 成都 610100; 3. 香港理工大学 土地测量与地理资讯学系, 香港

Recognition of Structures of Typical Road Junctions Based on Directed Attributed Relational Graph

XU Zhu¹, MENG Yanzizi², LI Zhilin³, LI Muzi¹

1. Department of Surveying Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China; 2. Sichuan Remote Sensing Geomatics Institute, Chengdu 610100, China; 3. Department of Land Surveying and Geo-Informatics, The Hong Kong Polytechnic University, Hongkong, China

Abstract: The focuses are on the recognition of structures of typical road junctions, which can facilitate structure based simplification of junctions. It is based on the observation that a road junction is a designed functional structure that consists of functional elements and the composition of elements often has a structural pattern. A typical road junction can therefore be represented by means of structural description and recognized by means of structural pattern recognition. The structural patterns of road junctions are represented as directed attributed relational graph (DARG) in this study. The collection of common road junction patterns constitutes a set of graph templates to be matched to. In order to recognize road junctions, a road network is first converted to a DARG. Then, junction patterns are searched in the resulting DARG of the road network. That is a process of subgraph matching. Ullman's algorithm for subgraph matching is adopted. Experiments have been carried out to evaluate the proposed technique.

Key words: map generalization; road junction; structural pattern recognition; attributed relational graph; graph matching

摘要: 提出采用有向属性关系图描述道路交叉口结构, 形成典型道路交叉口结构模板库。通过将道路网矢量表示转化成有向属性关系图表示, 采用图匹配技术识别道路网中的典型交叉口。实现有关算法, 通过试验验证该方法的有效性, 并分析其局限性和适用范围。该方法可在基于结构的交叉口简化过程中用于典型交叉口结构识别。

关键词: 地图综合; 道路交叉口简化; 结构模式识别; 属性关系图; 图匹配

中图分类号: P208 文献标识码: A

基金项目: 国家自然科学基金(40971209); 教育部博士点基金新教师基金(200806131021)

1 引言

道路网模型综合可以看成由两方面工作组成^[1]: 一是作为整体的道路网的简化, 其中关键问题是全局范围内道路的选取; 二是局部路网的简化, 其中关键问题是路网局部结构的识别。经过多年研究, 道路网自动综合在道路选取方面获得了较大进展, 特别是基于路划(stroke)的道路选取被公认为是一种较好的方法^[2]。然而, 进一步提高道路网模型综合的自动化程度和综合效果依赖于局部路网结构识别技术。因而, 最近几年, 路网中的局部结构模式识别成为许多研究工作的目标^[3]。

口识别问题。交叉口是道路网中基本而重要的局部结构。到目前为止, 关于路网局部结构识别的研究多集中在格网状结构、星状结构、环状结构等方面^[4-6]。关于交叉口识别研究, 文献[1]中, Mackaness 和 Mackechnie 提出了一种非结构化的交叉口识别与简化方法。他们观察到复杂交叉口往往出现在路段节点密集的地方, 于是设计了一种通过搜索路网中节点密集区域定位复杂交叉口的的方法, 在定位之后, 他们针对局部路网构造路段之间的层次关系, 进而采用图简化方法简化复杂交叉口。然而, 由于不能准确定位交叉口的范围、不能准确识别交叉口内部结构, 他们的方法在许多情况下会得出错误的简化结果。更重要的是, 由于不能预估简化结果正确与否, 需要人工逐

本文主要研究道路网模型自动综合中的交叉

一判断自动简化结果。

要实现准确的、可预估效果的道路交叉口简化也应当采取先识别后简化的思路,在未识别交叉口的前提下进行简化将难以避免成为盲目简化。交叉口的识别应依据其主要特征进行,交叉口本身是由路段构成的一种道路结构,因而其结构特征是其主要特征。早在 20 世纪 80 年代末期,学者们就认识到结构识别是地图自动综合中的关键问题^[7]。许多学者对地理要素分布的结构模式进行了研究,这种基于结构识别的思路已经被成功运用到河系、建筑群等地理要素的自动综合中^[8-9],前面提及的近期局部路网自动综合的主流思路依然是结构识别, Mackmaness 本人后来也专门撰文强调结构识别在地图综合中的极端重要性^[10]。

本文针对交叉口结构复杂、形态多样但又具有典型形式的特点,提出一种基于有向属性关系图及图匹配的交叉口识别方法。其中,有向属性关系图能够刻画复杂平交与立交口的结构特征,通过构造典型交叉口结构模块库可以一定程度上处理形态各异的交叉口,图匹配技术能够从路网中找到与模板匹配的交叉口,从而为实现达到先识别再简化提供识别技术基础。

2 交叉口典型结构及描述

2.1 交叉口典型结构

在道路网规划中,交叉口的设置、形状、规模等都有具体的规定^[11]。道路交叉口分为平面交叉口和立体交叉口两类。平面交叉口通常有 T 形、Y 形、十字形、X 形、错位、环形等形式。立体交叉口是道路不在同一个平面上相交形成的立体交叉。立体交叉有分离式和互通式两种。分离式立体交叉是只修立交桥而无匝道,相交道路互不连通,只保证直行交通互不干扰。互通式立体交叉设有连接上、下相交道路的匝道,可使各路车辆转向。它又可分为部分互通式立体交叉和完全互通式立体交叉。前者是对交通量很少的某方向交通仍做平面交叉处理以限制该方向的交通,有菱形、部分苜蓿叶型立体交叉;后者能保证相交道路上各方向的车辆可行驶到其他方向,有苜蓿叶型、喇叭型、定向型、环型等立体交叉。常见典型交叉口的矢量表示列于图 1。

由此,可以认为有相当大一部分道路交叉口是具有典型结构的,而且可以一定程度上被形式

化定义的。道路交叉口是道路网络中的一种功能结构,其功能是完成道路交汇与转向,其结构组成单元是路段,各组成路段组合在一起形成交叉口这种结构。而结构可以通过指定其组成单元以及组成单元的组合形式得以形式化。本文尝试采用有向属性关系图来形式化地描述典型道路交叉口。其中,以路段为结构组成单元,对应于有向属性关系图的节点;以路段之间的连通关系与连接方式来刻画道路交叉口中路段的组合形式,对应于有向属性关系图的边及边的属性。详述如后。

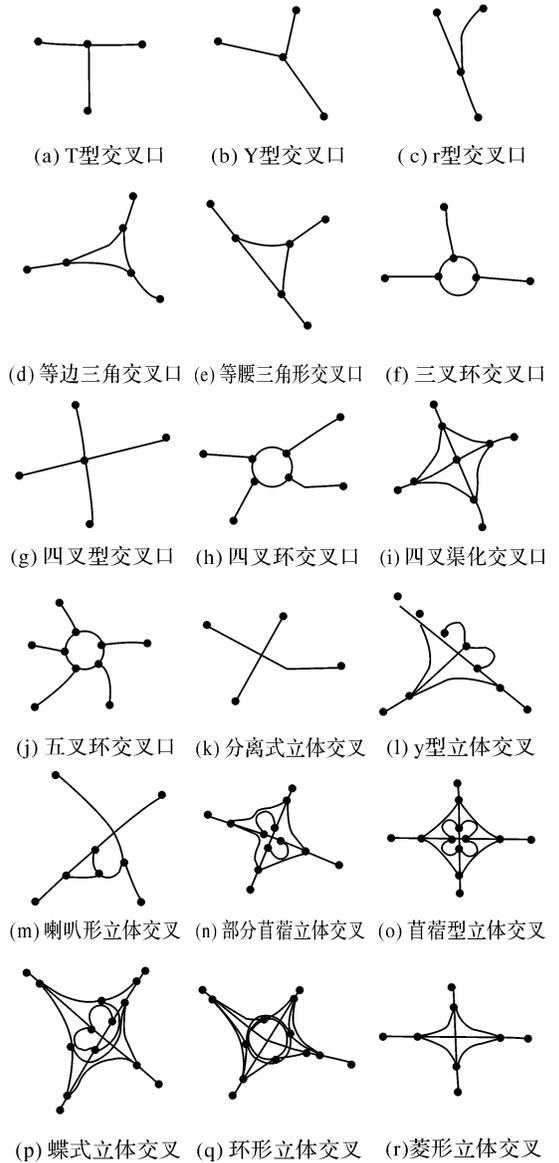


图 1 典型交叉口的矢量表示

Fig. 1 Vector representation of typical junctions

2.2 交叉口结构化描述

结构的形式化描述方法多种多样,包括串文法、树文法、图文法等^[12]。在此采用有向属性关

系图来形式化地刻画交叉口。属性关系图是计算机视觉中常用的描述和分析工具,是把统计和结构两种方法结合起来的一种模式描述方法^[13]。属性关系图即用图的结构直观地描述了模式的结构关系,又引入属性来描述模式的某些特征,因而具有较强的描述能力。

定义 1: 属性关系图 (attributed relational graph) 是一个六元组

$$G = (V, E, R_V, R_E, G_V, G_E)$$

式中, $V = \{v_1, v_2, \dots, v_{|V|}\}$ 为顶点的有限集, $|V|$ 是集合 V 中顶点的个数; $E = \{e_1, e_2, \dots, e_{|E|}\}$ 为边的有限集, 如 $e = (v_i, v_j), 1 \leq i, j \leq |V|, i \neq j$, 表示顶点 v_i 与顶点 v_j 之间的边, $|E|$ 是集合 E 中边的个数; R_V 为顶点属性集合; R_E 为边属性集合; G_V 为 $V \rightarrow R_V$ 是产生顶点属性的函数; G_E 为 $E \rightarrow R_E$ 是产生边属性的函数。

不难理解, 根据边是否具有方向性可以将属性关系图分为有向属性关系图和无向属性关系图两种。

如前面提到的, 交叉口是由路段组成的道路结构, 其主要特征是路段之间的连通关系及连接方式。在采用有向属性关系图描述交叉口时, 路段宜作为有向属性关系图中的顶点 (V), 路段之间的连通关系, 可作为有向属性关系图中的边 (E)。尽管路段 V 有包括几何、道路名称等属性可以作为有向属性关系图中顶点属性, 但在建立交叉口模式时, 应当只考虑一种类型的交叉口区别于其他类型交叉口的共同特性。在此, 忽略路段作为交叉口模式基元的属性, 而仅仅关注路段之间的连通关系和连接方式。连通关系表达出哪些路段之间可以通行, 而连接方式采用路段之间的夹角来刻画。这样, 在本文的方法中, R_V 为空, R_E 包括一个属性, 即连通路段之间的夹角, 称为转向角, 记为 θ 。其中, 连通关系可直接由矢量道路网模型获得, 夹角可有路段矢量表示计算得出。

采用以上方法, 以图 1 中所示的典型交叉口建立模板库, 限于篇幅这里仅就平交与立交情况各给出一个结构模板。

实例 1 等腰三角形交叉口

等腰三角形交叉口的矢量表达和有向属性关系图如图 2 所示, 其对应的有向属性关系图模板如表 1 所示。

实例 2 y 型立体交叉

y 型立体交叉的矢量表达和有向属性关系如

图 3 所示, 其对应的有向属性关系图模板如表 2 所示。

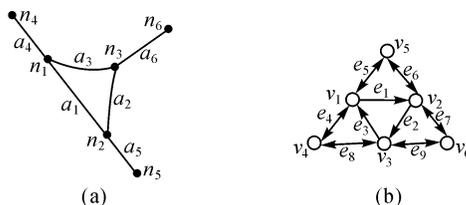


图 2 等腰三角形交叉口矢量 (a) 和有向属性关系图表达 (b)

Fig. 2 Vector (a) and ARG (b) representations of the isosceles triangle typed junction

表 1 等腰三角形交叉口有向属性关系图模板

Tab. 1 ARG template of the isosceles triangle typed junction

$V = \{v_1, v_2, v_3, v_4, v_5, v_6\}$
$E = \{e_1 \langle v_1, v_2 \rangle, e_2 \langle v_2, v_3 \rangle, e_3 \langle v_3, v_1 \rangle, e_4 \langle v_4, v_1 \rangle, e_5 \langle v_1, v_5 \rangle, e_6 \langle v_5, v_2 \rangle, e_7 \langle v_2, v_6 \rangle, e_8 \langle v_3, v_4 \rangle, e_9 \langle v_6, v_3 \rangle\}$
$R_V = \Phi$
$R_E = \{\theta\}$
$G_V = \Phi$
$G_E = \{\theta_{e_1} = 60^\circ, \theta_{e_2} = 120^\circ, \theta_{e_3} = 60^\circ, \theta_{e_4} = 180^\circ, \theta_{e_5} = 180^\circ, \theta_{e_6} = 120^\circ, \theta_{e_7} = 120^\circ, \theta_{e_8} = 120^\circ, \theta_{e_9} = 120^\circ\}$

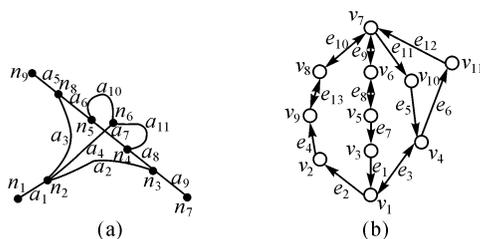


图 3 y 型立体交叉口矢量图 (a) 及有向属性关系图表达 (b)

Fig. 3 Vector (a) and DARG (b) representations of the y typed triangle typed junction

表 2 y 型立体交叉口有向属性关系图模板

Tab. 2 ARG template of the y typed junction

$V = \{v_1, v_2, v_3, v_4, v_5, v_6, v_7, v_8, v_9, v_{10}, v_{11}\}$
$E = \{e_8 \langle v_5, v_6 \rangle, e_9 \langle v_6, v_7 \rangle, e_{10} \langle v_7, v_8 \rangle, e_{13} \langle v_8, v_9 \rangle, e_3 \langle v_1, v_4 \rangle, e_5 \langle v_{10}, v_4 \rangle, e_{12} \langle v_{11}, v_7 \rangle, e_{11} \langle v_7, v_{10} \rangle, e_7 \langle v_5, v_3 \rangle, e_1 \langle v_3, v_1 \rangle, e_2 \langle v_1, v_2 \rangle, e_4 \langle v_2, v_9 \rangle, e_6 \langle v_4, v_{11} \rangle\}$
$R_V = \Phi$
$R_E = \{\theta\}$
$G_V = \Phi$
$G_E = \{\theta_{e_1} = 180^\circ, \theta_{e_2} = 150^\circ, \theta_{e_3} = 180^\circ, \theta_{e_4} = 150^\circ, \theta_{e_5} = 120^\circ, \theta_{e_6} = 120^\circ, \theta_{e_7} = 150^\circ, \theta_{e_8} = 180^\circ, \theta_{e_9} = 180^\circ, \theta_{e_{10}} = 180^\circ, \theta_{e_{11}} = 150^\circ, \theta_{e_{12}} = 150^\circ, \theta_{e_{13}} = 180^\circ\}$

3 交叉口识别

3.1 实例数据的有向属性关系图表示

将典型交叉口用有向属性关系图表示为模板后,识别道路交叉口就变成了有向图匹配的问题。

实施匹配前需将待识别的实例道路矢量图同样用有向属性关系图表示。在本研究中,要求道路的矢量数据不仅是使用道路的中心线表述,且要求给出符合交通规划的道路连接情况,以便于获取实例图的边。

转换算法不复杂,在此仅作简要介绍:首先,逐一将矢量表示中的路段转换为有向属性关系图中的节点,并赋予对应的标号;然后,根据矢量图中路段间连通关系,为有向属性关系图中的节点添加连接边。可分为两种情况:①矢量图中的路段单向连通关系转化为有向属性关系图中的一条边,给这条边赋予标号,并设定其起始和终结节点标号,同时,根据矢量图中路段的几何形状,计算“从”路段到“到”路段之间的转向角,并将所得的转向角作为有向属性关系图中这条边的一个属性;②矢量图中的路段双向连通关系转化为有向属性关系图中的两条边,对这两条中的每一条,按照与处理单向连通关系相同的方式赋予起始和终结节点标号,并计算、赋予转向角属性。路网有向属性关系图表示的节点、边数据结构如下,其中参数在转换过程中被赋值。

3.1.1 顶点数据结构

Structure vertex_type

```

Public vertex_no As Integer ' 顶点序号
Public vertex_oid As String ' 顶点对应于要素类中弧段的 OID
Public vertex_fn As Long ' 顶点对应于要素类中弧段的始节点
Public vertex_tn As Long ' 顶点对应于要素类中弧段的终节点

```

End Structure

3.1.2 边数据结构

Structure line_to_vertex_type

```

Public line_n As Integer ' 边的序号
Public qd_vertex_no As Integer ' 边的起点序号
Public qd_vertex_oid As String ' 边的起点对应于要素类中弧段的 OID
Public zd_vertex_no As Integer ' 边的终点序号
Public zd_vertex_oid As String ' 边的终点对应于要素类中弧段的 OID

```

End Structure

Public line_at_anglevalue As Double ' 边的属性值,即为要素类中两个弧段之间的夹角

End Structure

3.2 交叉口识别的图匹配方法

有了交叉口以有向属性关系图表示的结构模板,并获得了道路网实例的有向属性关系图表示后,在道路网中定位、识别交叉口就成了在道路网实例有向属性关系图中寻找、识别典型交叉口属性关系子图的过程。数学上有关的概念称为图同构或子图同构,模式识别领域称相应的技术为图匹配。

定义 2: 图同构(graph isomorphism)是一个从图 $G = (V, E, R_V, R_E, G_V, G_E)$ 到图 $G' = (V', E', R_{V'}, R_{E'}, G_{V'}, G_{E'})$ 的双射函数 $f: V \rightarrow V'$, 它满足

- (1) 对于任意 $v \in V$, 满足 $G_V(v) = G_{V'}(f(v))$;
- (2) 对于任意边 $e = (v_1, v_2) \in E$, 存在一条边 $e' = (f(v_1), f(v_2)) \in E'$, 使 $G_E(e) = G_{E'}(e')$; 同时, 对于任意 $e' = (v_1', v_2') \in E'$, 存在一条边 $e = (f^{-1}(v_1'), f^{-1}(v_2')) \in E$ 使得 $G_E(e) = G_{E'}(e')$ 。

可以很直观地看出,当两个图相同时,它们是同构的。但是在很多应用领域,需要将同构的条件放宽,允许将一个图映射到另一个图的一部分。这种映射称为子图同构,如定义 3。

定义 3: 双射函数 $f: V \rightarrow V'$ 是图 G 到 G' 的子图同构(subgraph isomorphism)函数,若存在子图 $S \subseteq G'$ 使 f 是 G 到 S 的图同构函数。

由以上定义可以看出,图同构是子图同构的特殊情况。子图同构的主要用途在于它能够识别较大的图中的某些模式。这正适合从道路网图中识别某一个交叉口。

子图同构的判断,最直接的方法是将两图的所有节点进行一一映射比较,找出符合同构要求的情况,但这样效率很低。本研究使用 Ullman 算法进行图匹配,算法具体细节参见文献[14],其效率改进要点说明如后。Ullman 算法是一种经典的子图同构算法,它采用回溯和前向检测的方法减少节点间可能映射的次数。它从某一对节点的映射开始,进行前向检测,看余下的所有节点是否至少存在一种映射情况使得图同构的条件满足。如果不存在,则回到上一级继续判断另一对节点;反之则判断下一对节点,直至找出所有结果。

本研究中交叉口图匹配识别流程如图 4 所

示。道路网实例中, 由于交叉口实例不可能如模板一样标准, 也由于存在数据误差和计算误差, 实例路段连接角与模板设定值会有一定差异。通过设定限差来处理这种差异, 本研究中路段转向角限差设为 $\pm 15^\circ$ 。

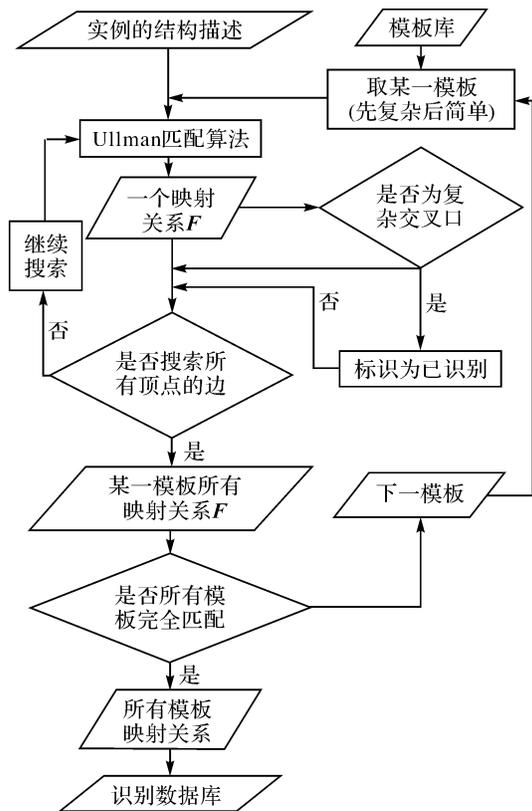


图 4 图匹配识别交叉口流程图

Fig. 4 Flow chart of junction recognition by means of subgraph matching

4 试验与分析

应用本文方法, 基于 ArcEngine 使用 VB. Net 语言开发了交叉口识别与简化系统, 见图 5。其模式库含典型交叉口 18 种 (见图 1), 其中平面交叉口 10 种, 立体交叉口 8 种。为验证方法的正确性, 选择了 4 个区域数据进行试验。其中前三个区域为香港部分地区路网矢量图, 第四个为成都市立体交叉口矢量图。试验情况如下。

4.1 试验区域一

试验区域一 (图 6) 为一个相对简单的道路网, 该道路网由 53 个路段组成。应用文中方法进行道路交叉口的识别, 识别等腰三角形交叉口 4 个, 四叉型交叉口 1 个, r 型交叉口 2 个, Y 型交叉口 3 个, T 型交叉口 9 个。可以从图上清晰地

看出复杂平面交叉口。经过对矢量图的判别分析, 本文方法能较好地识别该矢量图上的交叉口类型。

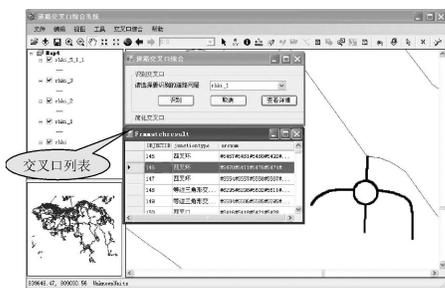


图 5 交叉口识别与简化系统

Fig. 5 The prototype system of junction recognition and simplification developed in this study

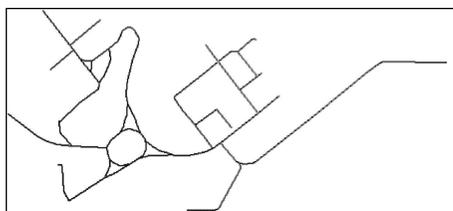


图 6 试验区域一

Fig. 6 Test area 1

4.2 试验区域二

试验区域二是一个相对复杂的道路网, 该道路网由 288 个弧段组成。应用文中的方法进行道路交叉口的识别, 识别出四叉环型交叉口 1 个, 三叉环型交叉口 1 个, 等边三角形交叉口 1 个, 四叉型交叉口 13 个, r 型交叉口 15 个, Y 型交叉口 21 个, T 型交叉口 72 个。经过对矢量图的判别分析, 本文方法能较好地识别该矢量图上的交叉口类型。部分复杂平面交叉口如图 7 所示。但是由于在定义模板时, 没有包含圆环型掉头路口, 因此未能识别区域内的圆环型掉头结构。

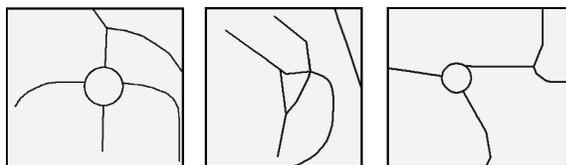


图 7 试验区域二中识别的部分复杂平面交叉口举例

Fig. 7 Examples of recognized junctions in test area 2

4.3 试验区域三

试验区域三选定的区域为一个更复杂的道路网, 该道路网由 481 个弧段组成。应用文中的方

法进行道路交叉口的识别,识别出等边三角形交叉口 2 个,等腰三角形交叉口 3 个,四叉型交叉口 32 个, r 型交叉口 47 个, Y 型交叉口 22 个, T 型交叉口 126 个。经过对矢量图的判别分析,本文的方法能较好地识别该矢量图上的平面交叉口类型。部分复杂平面交叉口如图 8 所示。由于设计的模板均为典型立体交叉口,在该图上不能识别出非典型立体交叉口。但是,通过对矢量图的分析可知,该矢量图中存在非典型的立体交叉口,因此,应寻求相应策略进行非典型立体交叉口的识别。

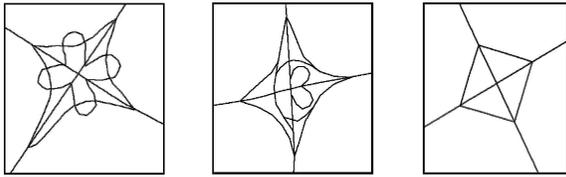


图 8 试验区域三中识别的部分复杂平面交叉口举例

Fig. 8 Examples of junctions recognized in test area 3

4.4 试验区域四

由以上三个区域的试验可以看出,本文方法能很好地识别各种类型的平面交叉口,但是却并没有识别出来立体交叉口。这是由于试验区域一、二没有立体交叉口,实验区域三的立体交叉口不典型,所定义的模版不能识别出来。

为了验证本文算法能很好地识别典型立体交叉口,试验区域四选用成都市立体交叉口矢量图进行,共有立体交叉口 28 个。基于定义的模板,本文方法识别了 21 个立体交叉口(图 9 列出了其中 3 个),其中分离式立体交叉口 2 个,为衣冠庙立交桥和成温立交桥; y 型立体交叉口 1 个,为机场立交桥;喇叭形立体交叉口 1 个,为羊犀立交桥;部分苜蓿型立体交叉口 1 个,为成渝立交桥;苜蓿型立体交叉口 7 个,分别为营门口、人南、成绵、天府、大丰镇、接待寺和螺蛳坝立交桥;蝶式立体交叉口 4 个,分别为成南、狮子桥、文家场和犀浦镇立交桥;环形立体交叉口 1 个,为航天立交桥;菱形立体交叉口 3 个,分别为桂溪、金牛和南华立交桥。未识别的 7 个立体交叉口均为非典型立体交叉口。

5 与现有方法的比较及讨论

本文与文献[1]研究同一问题,在此有必要将两文方法做个比较。从适用范围上讲,本文方法

仅对典型交叉口有效,并且,它所能识别的典型交叉口还取决于模板库的完整性。显然,即使是典型交叉口,如果没有在模板库中定义,也不能被识别,所以实际应用时应尽可能建立较为完整的模板库,以尽可能多地识别交叉口。而文献[1]方法不区别对待典型和非典型交叉口。从实用性上讲,本文方法虽然不能处理全部交叉口,但对于它所能识别的交叉口可以为正确简化提供保障,可以不要人工检查、核实,而文献[1]的方法虽然看似可以处理全部交叉口,但实际上,它无从判断是否处理得正确,需要人工逐一检查、核实/更正。

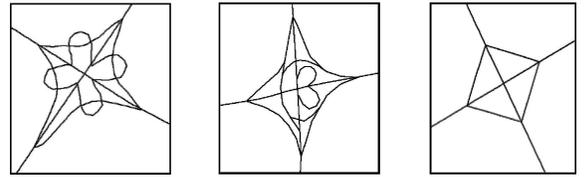


图 9 试验区域四中识别的立体交叉口举例(从左至右依次为成绵立交、城南立交、金牛立交)

Fig. 9 Examples of recognized interchanges in test area 4 (from left to right: the Chengmian, Chengnan, Jinniu interchanges respectively)

在实际应用中,结合两种方法,先运用本文方法自动处理典型交叉口,再运用文献[1]方法处理交互式地处理非典型交叉口,不失为一种可取的办法。

6 结束语

本文给出了一种基于有向属性关系图和图匹配技术的交叉口描述、识别方法。以路段作为交叉口结构模式基元能很好地表达交叉口的局部结构,有向属性关系图直接描述了交叉口的组成,并引入属性来描述路段连接特征,因而能准确地刻画典型交叉口。实验结果表明该方法对于处理典型交叉口很有效,只要能给出正确的模板描述,本文方法均能有效地识别出符合该模板类型的交叉口。同时,将典型交叉口分类能更好地抽取各类型交叉口的特性,为提出各自的简化方法提供了前提。

本文方法不能识别非典型结构交叉口,对非典型交叉口的识别有待进一步研究。不难理解,从原理上讲本文方法也可用于更详尽表示的交叉口的识别,但须重新定义结构模板。

参考文献:

[1] MACKANESS W. A., MACKECHNIE G. A. Automating

- the Detection and Simplification of Junctions in Road Networks[J]. *GeoInformatica*, 1999, 3(2): 185-200.
- [2] THOMSON R, BROOKS R. Generalisation of Geographical Networks[C] // *Generalisation of Geographic Information: Cartographic Modelling and Applications*. Amsterdam: Elsevier Science & Technology Books, 2007: 255-268.
- [3] HEINZLE F, ANDERS K H. Characterising Space via Pattern Recognition Techniques: Identifying Patterns in Road Networks[C] // *Generalisation of Geographic Information: Cartographic Modelling and Applications*. Amsterdam: Elsevier Science & Technology Books, 2007: 233-254.
- [4] YANG Bisheng, LUAN Xuechen, LI Qingquan. An Adaptive Method for Identifying the Spatial Patterns in Road Networks[J]. *Computers, Environment and Urban Systems*, 2010, 34(1): 40-48.
- [5] HEINZLE F, ANDERS K H, SESTER M. Pattern Recognition in Road Networks on the Example of Circular Road Detection[C] // *Proceedings of GIScience 2006*. Berlin: Springer, 2006: 153-167.
- [6] HEINZLE F, ANDERS K H, SESTER M. Automatic Detection of Pattern in Road Networks—Methods and Evaluation[C] // *Proc of Joint Workshop Visualization and Exploration of Geospatial Data*. Stuttgart: ISPRS, 2007: 211-215.
- [7] BRASSEL K E, WEIBEL R. A Review and Framework of Automated Map Generalization [J]. *Int Journal of Geographical Information Systems*, 1988, 2(3): 229-244.
- [8] AI Tinghua, LIU Yaolin, HUANG Yafeng. The Hierarchical Watershed Partitioning and Generalization of River Network [J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2007, 36(2): 232-236. (艾廷华, 刘耀林, 黄亚峰. 河网汇水区域的层次化剖分与地图综合[J]. *测绘学报*, 2007, 36(2): 232-236.
- [9] LI Z, YAN H, AI T, et al. Automated Building Generalization Based on Urban Morphology and Gestalt Theory[J]. *Int J of Geographic Information Science*, 2004, 18(5): 513-534.
- [10] MACKANESS W, EDWARDS E. The Importance of Modelling Pattern and Structure in Automated Map Generalisation[C] // *Proceedings of the Joint ISPRS/ICA Workshop on Multi scale Representations of Spatial Data*. Ottawa: Canada Centre for Remote Sensing, 2002: 1-11.
- [11] SONG Peikang. Planning and Design of Urban Road Junctions[M]. Tianjing: Press of Tianjin University. 1995: 154. (宋培抗. 城市道路交叉口规划与设计[M]. 天津: 天津大学出版社, 1995: 154.)
- [12] FU Kingsun. Pattern Recognition and Its Application[M]. Beijing: Science Press, 1983. (傅京孙. 模式识别及其应用[M]. 北京: 科学出版社, 1983.)
- [13] DING Yihong, PING Xijian, HU Min. A New Linear Texture Description Method Using Attributed Relational Graph and Its Application [J]. *Journal of Computer Research and Development*, 2002, 39(9): 1076-1081. (丁益洪, 平西建, 胡敏. 线状纹理的一种属性关系图描述方法及其应用[J]. *计算机研究与发展*, 2002, 39(9): 1076-1081.)
- [14] ULLMAN J R. An Algorithm for Subgraph Isomorphism [J]. *Journal of the Association for Computing Machinery*, 1976, 23(1): 31-42.
- [15] MENG Yanzi. A Structural Approach to the Recognition and Simplification of Road Junctions[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University. 2009. (蒙艳姿. 道路交叉口的结构化识别与简化[D]. 成都: 西南交通大学, 2009.)

(责任编辑: 丛树平)

收稿日期: 2010-01-08

修回日期: 2010-03-15

第一作者简介: 徐柱(1972—), 男, 博士, 副教授, 研究方向为空间数据综合、空间数据共享、GIS 软件体系结构等。First author: XU Zhu(1972—), male, PhD, associate professor, majors in spatial data generalization, spatial data sharing, and architecture of GIS software, etc.

E mail: xuzhucn@gmail.com