

基于 Delaunay 三角网的大规模 CORS 基准站 组网技术研究*

梅生强¹⁾ 官煦利¹⁾ 姚宜斌¹⁾ 王泽民¹⁾ 黄石磊²⁾

(1) 武汉大学测绘学院, 武汉 430072
(2) 浙江省宁波市北仑区房地产管理处, 宁波 315800)

摘要 连续运行参考系统(CORS)的核心技术——GPS网络实时动态定位(RTK)技术已经成为GPS高精度定位中一种重要技术,其定位精度与站间距离密切相关。在构建了站间距离和网络分布适中的Delaunay三角网后,探讨了两个相邻CORS基准站网络的联合组网、基准站点删除与插入等网络局部更新以及参考站最优选择问题,提出了相应的优化算法,实验证明该算法高效快捷、简便可靠。

关键词 连续运行参考系统;Delaunay三角网;联合组网;局部更新;限制区域生长法

中图分类号:P228.4

文献标识码:A

CONSTRUCTION OF VAST CORS FIDUCIAL STATIONS NETWORK BASED ON DELAUNAY TRIANGULATE NETWORKS

Mei Shengqiang¹⁾, Gong Xuli¹⁾, Yao Yibin¹⁾, Wang Zemin¹⁾ and Huang Shilei²⁾

(1) School of Geodesy and Geomatics, Wuhan University, Wuhan 430072
(2) Real Estate Management Office of Beilun District, Ningbo 315800

Abstract As a core technique of CORS, GPS network RTK has been developed as one of the most important techniques of precise GPS positioning. The positioning precision depends on the distance between fiducial stations and the distribution of the CORS fiducial station networks. This paper discusses the joint networking of two neighbor networks, partial updating such as points deleting and inserting, and the selection of the best reference stations. Some optimization algorithms are put forward, which have been proved fast, efficient, simple and reliable.

Key words: CORS (Continuous Operatinal Reference System); Delaunay triangulate networks, joint networking; partial updating; restricted area growth method

1 引言

GPS网络实时动态定位(RTK)技术日渐成熟,以其为核心技术的CORS(连续运行参考系统)在全世界范围内广泛建立,全面取代常规测量控制网。

网络实时动态定位(RTK)系统服务的主要技术有虚拟参考站(VRS)技术、区域改正参数(FKP)方法、综合误差内插法(CBI)、主辅站技术(MAX)等。在GPS差分定位中,影响定位精度的误差主要是距离相关误差,因此构建站间距离适中和网络分布均匀

* 收稿日期:2007-10-01

基金项目:国家863计划(2006AA12Z323);国家973计划(2006CB701301);国家自然科学基金(40774008);教育部留学回国人员科研启动基金(教外司留(2006)331号)

作者简介:梅生强,男,1983年生,硕士研究生,主要研究方向为网络RTK技术. E-mail:sq_mei@163.com

的最优参考站网络极为重要。大量理论研究和实践结果表明,不规则三角网是构成参考站网络的较好方式,其中 Delaunay 三角网方法构建的三角网具有从局部到整体最优的特性^[1]。

Delaunay 三角形是由连接 Voronoi 图中具有公共边相邻多边形的生长中心形成的网络。它具有两个显著特征:

1)空外接圆性质。在点集 V 所形成的 Delaunay 三角网中,其每个三角形的外接圆均不包含点集 V 中的任何其它点;

2)最大的最小内角性质。在由点集 V 所形成的 Delaunay 三角网中,Delaunay 三角网中三角形的最小内角是最大的。

这两个性质,决定了 Delaunay 三角网具有极大的应用价值。Miles 证明 Delaunay 三角网是“最好”的三角网;Lingas 进一步论证了“在一般情况下, Delaunay 三角网是最优的”;Sibson 认定“在一个有限点集中,只存在一个局部等角的三角网,这就是 Delaunay 三角网”;Tsai 认为,“在不多于三个相邻点共圆的欧几里德平面中, Delaunay 三角网是唯一的”^[1]。

刘晖^[2]在 2005 年提出了 CORS 系统的“服务缝隙”问题。在两个相互独立的系统之间,尽管两侧都有基准站,但是由于系统之间缺乏互操作性,两服务区域之间存在缝隙,用户在服务缝隙内得不到有效服务。如果在网络协议上实现两个系统间数据共享,利用对方某几个站的数据实现两网业务互联,则会解决这一问题。选择哪些基站,两网之间如何构网,将是 CORS 系统工作面临的问题。

要解决“服务缝隙”问题,首先必须解决相邻 CORS 系统间基准站联合组网问题。基于 Delaunay

三角网性质,在两个网临近(或者小部分重叠)的区域进行联合组网,其影响区域只会限制在相互影响的邻接区域,不会扩展到任何一个子网的全部区域。

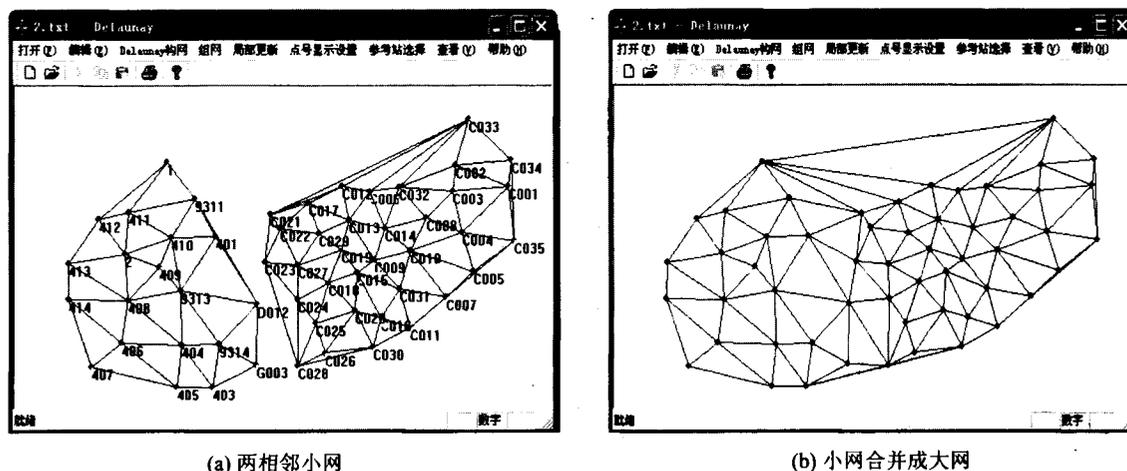
对于 CORS 系统来讲,由于多种因素的影响,若干基准站可能在流动站作业的时候出现工作故障,发出的改正信息不可用,我们需要将它们从网中删除,并在删除的局部区域重新构网;如果这些基准站恢复正常,需要重新将它们纳入网中,或者由于城市扩建需要在网的边缘加设若干基准站,那么就要在局部区域修改三角网。这两种情况我们称为 CORS 系统基准站 Delaunay 三角网局部更新。

本文在 CORS 系统应用 VRS 技术中基准站网构建 Delaunay 三角网后,探讨了相邻两个 CORS 系统基准站网络联合组网、基准站点删除与点插入局部网络更新以及参考站最优选择问题,提出了相应的优化算法,并且使用 VC++ 语言逐步实现了该算法。

2 CORS 基准站构建 Delaunay 三角网及子网组成大网

基准站构建 Delaunay 三角网,本文借鉴了区域生长自动连接算法^[3]。这里使用了 MFC 中 COblist 类管理点、边、三角形链表^[4-6]。在以基准站为离散点的区域,首先生成一个满足条件的三角形,然后以这 3 条边为基础分别向 3 个不同的方向寻找满足条件的点扩展成新的三角形,然后再以新生成的边扩展;直至三角网充满整个区域(图 1(a))。离散点生成 Delaunay 三角网后,采用凸包插值算法中生成初始大凸包的算法^[7],生成该网包含所有点的大凸包,为局部更新做准备。

对于子网合并成大网,我们可以借鉴分而治之



(a) 两相邻小网

(b) 小网合并成大网

图 1 子网构网及联合组网

Fig. 1 The construction of subnets and their combination

法生成 Delaunay 三角网中子网合并算法(图 1(b))。但是,对于 CORS 系统来说,基准站往往只有数十个到上百个,考虑到复杂度问题,本文直接将两个子网的基准站点放入一个点链表中生成一个大网,避免考虑两个子网临近区域复杂的情况。

子网组成大网时,已经生成了大网点链表 $m_BigbasePoint$ 、大网凸包顶点链表 $m_BigzeList$ 、大网边链表 $m_BigedgeList$ 和大网三角形链表 $m_BigTriList$ 。

3 Delaunay 三角网局部更新算法及实现

在 Delaunay 三角网局部更新中,点删除和点插入都是在子网组成大网后进行的。

1) 点删除。在已生成的 Delaunay 三角网中,以某点为顶点的三角形构成其影响区域,删除该点后只需要在这个区域内局部构网,更新原 Delaunay 三角网即可。本文根据 Delaunay 三角形特性和区域生长自动连接算法,提出限制区域生长法,对点删除区域重新构网(图 2)。

设待删除的点为 P 点,点删除步骤为:

步骤 1:遍历大网凸包顶点链表,若 P 点是凸包顶点,将 P 点从大网点链表中删除,将新的大网所有点重新构网。若 P 点在大网的凸包上,删除后局部构成的三角网不仅对三角形新建有影响,还可能对大网的凸包有影响。考虑到复杂度的问题,本文没有采用局部更新,而是采用重构的方法。若 P 点不是凸包顶点,表明 P 点在三角网内部,转步骤 2;

步骤 2:遍历大网三角形链表,若其为空,转步骤 4;否则寻找顶点包含 P 的三角形,将顶点不包含 P 的第三边两个顶点按逆时针排序,存入区域点链

表 $base$ 中,该边存入区域边链表 $edge$ 中,该三角形从大网三角形链表中删除;

步骤 3:重复进行步骤 2;

步骤 4:遍历大网边链表,寻找顶点包含 P 的所有边并将其从中删除,然后将 P 点从大网点链表中删除。

步骤 5:在以区域边链表中所有边围成的区域中,以区域点链表中所有点为离散点,按照限制区域生长法生成区域 Delaunay 三角网。将新生成的边和三角形分别加入到大网边链表和大网点链表中。最后清空区域边链表和区域点链表。

这样就完成了 Delaunay 三角网的局部点删除工作。

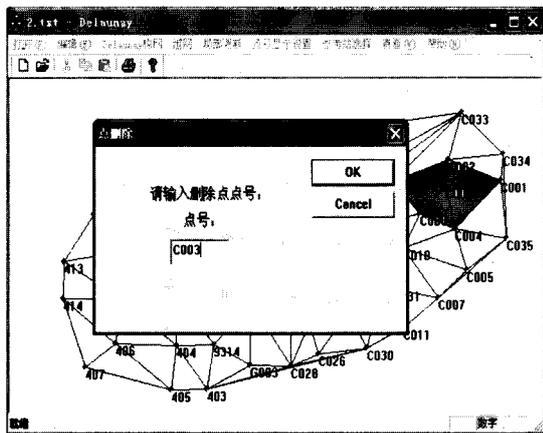
对于限制区域生长法,其原理为:在以若干边首尾相连形成的封闭多边形(允许出现凹边)内部,此多边形所包围的区域必须是生成 Delaunay 三角网的影响区域——限制区域,按照生长法原理生成以外边为边界的最优 Delaunay 三角网。

点删除区域重新构网步骤为:

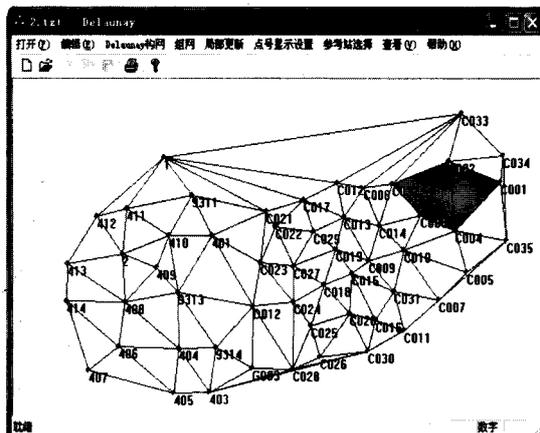
步骤 1:多边形边界上的边称为旧边,将其按照逆时针方向排序,保证多边形内部在旧边左侧。将旧边存入工作队列 $m_worklist$,旧边顶点存入点链表 $base$;

步骤 2:遍历工作队列。若其为空,执行步骤 4;否则取出其中第一条边(待扩展边),遍历 $base$,找出在该边左侧并且与该边形成张角最大的点,将此点与边组成三角形。生成的三角形两条新边按照第三点位于右侧的原则定向,存入 $m_worklist$ 中。存入之前需检测该边是否已存在,若存在则将其从 $m_worklist$ 中移出,否则将其存入;

步骤 3:循环执行步骤 2;



(a) 删除前(C003 为待删除点)



(b) 删除后

图 2 点删除

Fig. 2 Deleting a point

步骤 4: 清空 $m_worklist$ 和 $base$, 完成构网。

限制区域生长法借鉴 Delaunay 三角网生长法思想, 遵循旧边使用一次、新边使用两次、在待扩展边左侧找点的原则构网。采用限制区域生长法构网, 无须限制多边形的凸凹性质, 无须局部优化, 简单方便, 是 Delaunay 三角网内部点删除局部更新的优良算法。

2) 点插入。对一插入点, 外接圆包含该点的所有三角形所构成的多边形区域称为该点的影响域, 并且多边形的边界与该点构成的三角形均为 Delaunay 三角形^[8]。点插入采用的是凸包插值算法中离散点内插思想^[7]。

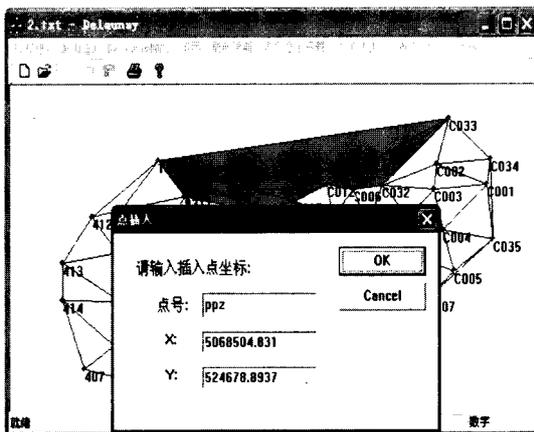
设待插入点为 Q 点, 点插入步骤为:

步骤 1: 遍历大网凸包顶点链表, 将前后两点连成一条凸包边, 若 Q 点在其中某一条边的右侧或边上, 表明 Q 在 Delaunay 三角网的外部或边界上。将

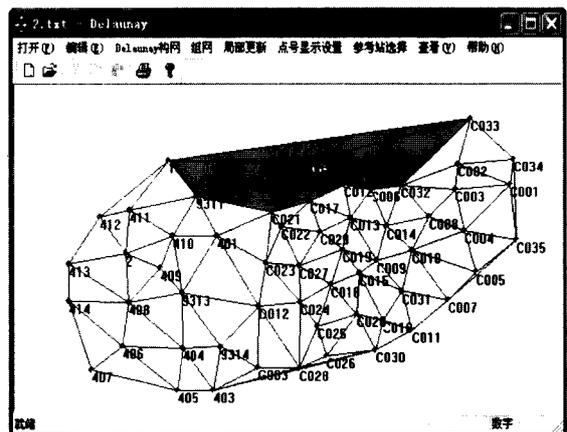
Q 点插入到大网点链表, 把新大网点链表中所有点重新构网, 完成点插入工作。这种情况下生成的局部新 Delaunay 网可能会影响到大网凸包边和局部若干三角形, 本文考虑到复杂度问题, 在这里进行重构 Delaunay 三角网, 而没有选择局部更新的方法。若 Q 点在所有凸包边的左侧, 表明 Q 点在 Delaunay 三角网的内部, 转步骤 2;

步骤 2: 遍历大网三角形链表, 寻找外接圆包含 Q 点的所有三角形, 将这些三角形从大网三角形链表中删除, 其公共边从大网边链表中删除, 剩下的边构成了一个包含 Q 点的多边形(注意该多边形不一定是凸多边形)。将该多边形的每一条边与 Q 点组成新的三角形并存入大网三角形链表, 生成的新边存入大网边链表中。

这样就完成了点插入工作(见图 3)。



(a) 插入前 (待插入点为 PPZ)



(b) 插入后

图 3 点插入

Fig. 3 Inserting a point

4 流动站对所需参考站三角形搜索算法及实现

当完成子网组成大网、大网局部更新等工作, 流动站在子网内部, 子网之间或子网边缘等区域工作时, 对基准站的选择就如同在一个网中进行了。对于 VRS 而言, 我们采用重心基准原则^[3], 即当流动站在网内作业时, 选择其所在的三角形 3 顶点为基准站; 当流动站在三角形公共边上或者网外作业时, 选择重心距离流动站最近的三角形 3 顶点为基准站。当在两个相邻 CORS 子网之间作业时, 选择的基准站可能分布在两个网中。

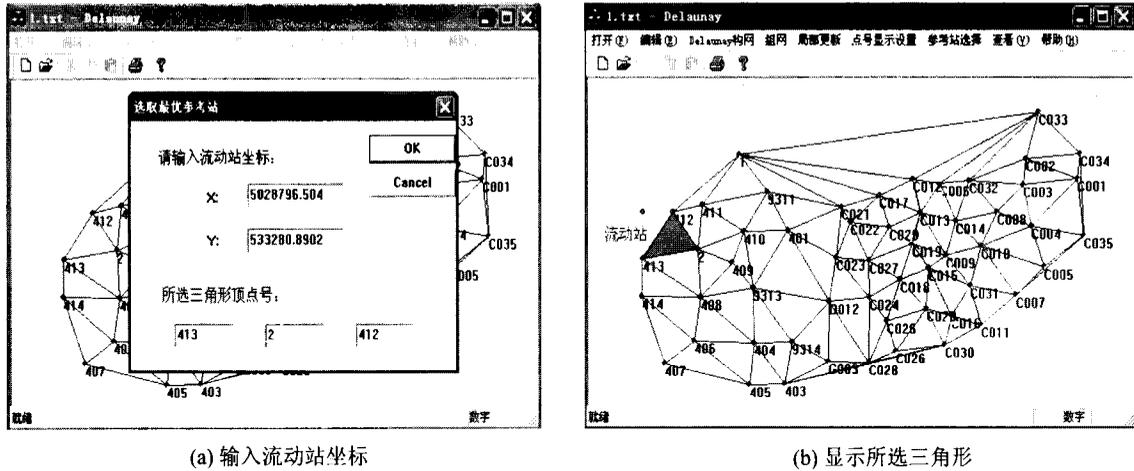
输入流动站初始坐标, 对话框中就会出现所选三角形 3 顶点坐标, 并且在网中所选三角形为绿色并闪烁。这样流动站就选择了这 3 个参考站, 使用

这 3 个站的差分改正信息进行定位(见图 4)。

5 结束语

基于以上算法, 作者开发了“Delaunay_mg”软件, 实现了 CORS 系统基准站构网、小网联合组网、大网局部更新和流动站对最优参考站自动选择等功能。结果表明, “Delaunay_mg”软件稳定正常, 符合流动站外业工作要求。

本文提出的限制区域生长法, 只需在局部区域进行更新, 简便快捷, 可以提高 Delaunay 三角网局部更新效率, 尤其是在包含大量离散点的 DEM(数字高程模型)图形中, 更能体现出其优越性。我国全国性 CORS 大网已在规划当中, 本文算法在区域性 CORS 小网组成全国性 CORS 大网中也能解决相应问题, 而且该算法在 DEM 数据不规则点生成 TIN



(a) 输入流动站坐标

(b) 显示所选三角形

图 4 选择最优参考站

Fig. 4 Selecting the best reference station

(不规则三角网)及其动态更新中也有较好应用前景。

参 考 文 献

1 武晓波,王世新,肖春生. Delaunay 三角网的生成算法研究[J]. 测绘学报,1999,28(1):28-35.

1 Wu Xiaobo, Wang Shixin and Xiao Chunsheng. Generation algorithms of Delaunay triangle network[J]. Acta Geodetica et Cartographica Sinica,1999,28(1):28-35. (in Chinese)

2 刘晖. 地球空间信息网格及其在连续运行参考站网格中的应用研究[D]. 武汉:武汉大学,2005.

2 Liu Hui. Geospatial information grid and its application in continuous operation Reference Station Grid[D]. Wuhan: Wuhan University,2005. (in Chinese)

3 邹蓉,等. Delaunay 三角网构网技术在连续运行卫星定位服务系统中的应用[J]. 测绘信息与工程,2005,30(6):9-11.

3 Zou Rong, et al. The application of Delaunay triangle networking in continuous operational satellite positioning service system[J]. Journal of Geomatics,2005,30(6):9-11. (in Chinese)

4 严迪新,班建民. Visual C++ 程序设计[M]. 北京:科学出版社,2005.

4 Yan Dixin and Ban Jianmin. Visual C++ program design

[M]. Beijing: Science Press,2005. (in Chinese)

5 赛奎春,等. Visual C++ 工程应用与项目实践[M]. 北京:机械工业出版社,2005.

5 Sai Quanchun, et al. Visual C++ application with the project practice[M]. Beijing: Industrial Machine Press,2005. (in Chinese)

6 [美] Stephen Prata 著,孙建春,韦强译. C++ Primer Plus (第五版)中文版[M]. 北京:人民邮电出版社,2006.

6 [American] Stephen Prata. Translated by Sun Jianchun and Wei Qiang. C++ Primer Plus (Fifth Edition) Chinese version[M]. Beijing: Posts & Telecom Press,2006. (in Chinese)

7 胡鹏,黄杏元,华一新. 地理信息系统教程[M]. 武汉:武汉大学出版社,2002.

7 Hu Peng, Huang Xingyuan and Hua Yixin. Geographic information system directory [M]. Wuhan: Wuhan University Press,2002. (in Chinese)

8 宋占峰,蒲浩,詹振炎. 快速构建 Delaunay 三角网算法研究[J]. 铁道学报,2001,23(5):85-91.

8 Song Zhanfeng, Pu Hao and Zhan Zhengyan. Rapid construction of the Delaunay triangulation algorithm [J]. Journal of the China Railway Society,2001,23(5):85-91. (in Chinese)