

基于最小路由代价树的大规模显微图像拼接方法

龚咏喜¹⁾ 田原¹⁾ 谢玉波^{2),3)} 刘瑜¹⁾ 邬伦¹⁾

¹⁾ (北京大学遥感与地理信息系统研究所, 北京 100871)

²⁾ (武汉大学测绘遥感信息工程国家重点实验室, 武汉 430079) ³⁾ (华北计算技术研究所, 北京 100083)

摘要 为了对大规模显微图像进行高质量的拼接, 首先提出拼接图的概念及获得高质量全景图像的3个原则, 然后采用分块-空间聚类算法配准相邻图像, 同时评估配准质量, 并计算拼接图的边的权值; 最后在此基础上, 提出了一种基于最小路由代价生成树的图像拼接方法, 该方法通过计算拼接图的最小路由代价生成树来确定所有图像的全局位置, 并用来生成全景图像。实验结果表明, 该方法可获得高质量的全景图像。

关键词 图像拼接 全景图 拼接图 空间聚类 最小路由代价生成树

中图法分类号: TP391.41 文献标识码: A 文章编号: 1006-8961(2009)06-1178-10

A Method for Large-scale Microscope Images Mosaicing Based on Minimum Routing Cost Spanning Tree

GONG Yong-xi¹⁾, TIAN Yuan¹⁾, XIE Yu-bo^{2),3)}, LIU Yu¹⁾, WU Lun¹⁾

¹⁾ (Institute of RS & GIS, Peking University, Beijing 100871) ²⁾ (State Key Laboratory of Information Engineer in Surveying Mapping and Remote Sensing, Wuhan University, Wuhan 430079) ³⁾ (North China Institute of Computing Technology, Beijing 100083)

Abstract In order to build high quality panoramic image, the conception of a mosaicing graph and three rules for high quality panoramic image are presented in the paper. An image registration algorithm based on blocking-spatial clustering is used to calculate the registration position and to evaluate the registration quality of pairs of images to obtain weight of edge in mosaicing graph. Then a method of images mosaicing based on minimum routing cost spanning tree is proposed to calculate global optimum position of every image by constructing the minimum routing cost spanning tree of the mosaicing graph and to create the panoramic image. In the case study, the proposed method demonstrates high quality.

Keywords images mosaicing, panoramic image, mosaicing graph, spatial cluster, minimum routing cost spanning tree

1 引言

目前图像的拼接和全景图的生成已经成为图像处理的一个重要的研究课题, 在机器人技术、计算机视觉、视频监控、虚拟现实、互动电视、虚拟行走、显微影像、遥感等方面有着广泛的应用^[1-4]。

图像拼接的基础是两幅图像间的像对配准。目前像对间配准主要分为基于区域和基于特征的配准两种方法^[2-3], 这些方法采用多种指标来度量评价像对间的相似程度^[5], 以获得准确的配准位置; 接着金字塔多层分解算法^[6]、基于小波的快速算法^[7]以及SSDA^[8]等相继被提出, 以提高配准速度。这些方法一般可获得准确的配准位置, 但是无法明确

基金项目: 国家高技术研究发展计划(863) 基金项目(2007AA12Z216, 2007AA120502); 国家自然科学基金项目(40701134, 40771171, 40629001)

收稿日期: 2007-05-29; **改回日期:** 2008-01-16

第一作者简介: 龚咏喜(1974 ~), 男。现为北京大学地图学与地理信息系统专业博士研究生。主要研究方向为地理信息系统、图像处理。E-mail: yongxi_gong@163.com

评价配准结果的质量,也无法正确比较不同像对间配准结果的质量。

在全景图像拼接方面,早期算法主要是依次计算相邻两幅图像的变换参数,并首先通过焦距估算和参数校正等方法来减少相邻图像间的误差,然后以此生成全景图像^[9-12]。由于这些方法仅考虑像对间拼接关系,致使全景图像拼接质量严重依赖于每一对相邻图像的配准结果,因此部分像对配准失败及误差将传递给其他图像,并积累,从而导致全局图像拼接的错误或不一致。

为了减少因局部图像拼接错误或误差而造成全局图像的拼接错误和积累误差,许多方法采用全局拼接模型,通过图像之间的拓扑关系^[13]、图像序列的裂缝闭合^[14]、最小二乘法^[15-16]或采用多种方式结合^[17]来校正局部误差,以形成全局一致的全景图像。

在此基础上,基于图理论的全景图像拼接方法被提出^[18-20],如通过构造图的最小生成树(MCST)^[21]使连接像对边总体误差最小来实现全局误差最小化^[20]。更多的方法则采用最短路径生成树(SPST)^[21]算法,在像对配准的基础上,先选择一幅图像作为参考帧,然后以此为根,通过生成图的最短路径树来确定每幅图像的全局位置^[22-25]。针对参考帧选择的任意性,一种改进方法先以图的中值点(median)为根来生成最短路径树(中值点是指图的最短路径生成树中,路径之和最小的树的根节点^[26]),然后以该生成树来校正局部拼接关系,并确定所有图像的全局位置^[27]。

上述图像拼接算法主要用于自然场景的全景图生成,图像数量大多在十几或几十幅图像左右,少有几百幅或上千幅图像,而且为了取得比较好的拼接效果,往往要求图像之间具有高达 70% ~ 80% 的重叠率^[28],其拼接结果精度不高,这种全景图像主要用于一般浏览,难以保证全景图像的质量,也难以满足大规模显微图像拼接的要求。

序列显微图像是使用显微仪器采集的大量显微图像,这些图像覆盖目标的全区域,且相邻图像之间具有一定重叠。序列显微图像一般应用于医学、大规模集成电路等领域,由于采集图像的仪器较为专业,因此图像的变形和旋转等误差可以忽略不计。但显微图像拼接有以下特别的要求:

(1) 图像的数量巨大,一般多达几百张,如普通组织切片在 40 倍放大镜下大小 1 600 × 1 200 pixels

的图像有几百张,部分达 1 000 到 2 000 多张,局部拼接累积误差可导致全局图像中裂缝或错位;

(2) 每个目标对象的图像为多行多列,且仅同行邻列或者同列邻行的图像之间才有较大的重叠,一般图像之间的重叠率较低,部分局部配准还可能因为配准区域模糊、空白或配准对象较少而导致配准结果产生较大的误差或错误;

(3) 在医学和大规模集成电路等应用领域,由于拼接形成的全局图像会被用来进行分析与进一步处理,因此对全景图像的准确性和精确性要求很高,如医学切片的全局图可能会被用来进行诊断、教学或病理分析,而集成电路的显微图像则可能用来对电路进行分析,拼接质量较差的全景图像将造成严重后果。因此在进行大规模显微图像的拼接时,要求在现有方法的基础上进行改进,研究更为可靠、拼接质量更高的新方法。

目前基于全局拼接的主要方法大多采用了基于图的方法。一般全局算法是间接利用图中的环进行局部拼接的校正,而基于生成树的全局算法还可以进行优化解的选择。后者更多地利用了图的特性,但解的选择仍然可以进一步优化。

本文提出了一种方法,该方法先基于分块-空间聚类算法来配准相邻图像,并对其结果进行评价;然后根据全局一致性对局部拼接进行校正;最后基于最小路由代价生成树(MRCT)来求解全局的优化解,以减少全局拼接的总体误差和生成质量较高的全景图像。本方法的工作流程如图 1 所示。



图 1 图像拼接的主要工作流程
Fig. 1 The workflow of image mosaicing

2 拼接图及图像拼接的 3 个原则

显微图像拼接中的拼接图(MG)为无向带权图,记为 $G(V, E, w)$, 其中 V 为图像集, E 为图像间配准关系集, w 为边的权值。由于显微图像排列较为规则,形如 M 行 N 列($M \times N$)的矩阵,因此其顶点 v 可以用一对有序整数 (i, j) 来表示,其中 i 为图像的行号($0 < i \leq M$),可表示为 $row(u)$, j 为图像的列号($0 < j \leq N$),可表示为 $col(v)$,且仅同行或同列相

邻的顶点之间才有边相连,即

$$E(G) = \{(u, v) \mid |col(u) - col(v)| + |row(u) - row(v)| = 1, u, v \in V(G)\} \quad (1)$$

图 2(a) 展示了一个 2 行 3 列的显微图像拼接图,为了叙述方便,图中仍然使用编号来表示顶点。图中的每一个顶点代表了一幅图像,边代表了两幅图像之间的拼接关系,每个边都有一个非负权值,并且仅同行相邻列之间或者同列相同行之间才有边连接,如边(1,2)、(2,3)等为同行相邻列,边(1,6)、(2,5)等为同列相邻行。

在图像拼接中,总存在部分拼接错误或者误差较大的边,而拼接图的一个生成树就可以确定所有图像的全局位置,如果存在环路,则部分图像的全局位置可以通过多个路径来计算,从而存在着冲突。对于拼接图,由哪个生成树能够得到优化的全景图像是首要问题。设拼接图为 $G(V, E, w)$, 其生成树为 T , 其中权值为比率量^[27], 且顶点 u, v 在树 T 中的最短路径为 $SP_T(u, v) = (u = r_1, r_2, \dots, r_n = v)$, 其中 $r_i \in V(T)$, 则 (u, v) 在树 T 中的最短路径长度 $d_T(u, v)$ 可表示为路径中各边权值的累加,即

$$d_T(u, v) = \sum_{i=1}^{n-1} w(r_i, r_{i+1}) \quad (2)$$

在进行显微图像拼接时,对于每一对相邻的像对,当它们之间的路由代价最小时,其拼接的效果最好;而从整体上来看,当所有相邻像对在生成树中的路由代价之和最小时,其所生成的全景图像的质量最高,即拼接图的邻接节点最小路由代价生成树(AVGMRST)是全局拼接误差最小的生成树。记拼接图 G 的邻接节点最小路由代价(adjacent-vertex-in-graph minimum routing cost)为 $AVGMRC(G)$, 即

$$AVGMRC(G) = \min \left\{ \sum_{\substack{u, v \in V(G), \\ e(u, v) \in E(G)}} d_T(u, v) \right\} \quad (3)$$

图 2(a) 为拼接图,其最优生成树应该使节点对(1,2)、(2,3)、(1,6)、(2,5)、(3,4)、(5,6)和(4,5)在该树中的路径之和最小(如图 2(b)所示),图 2(b)即为图 2(a)的邻接顶点最小路由代价生成树。图 2(c)所示的最小生成树和图 2(d)所示的以顶点 2 为根的最短路径生成树则较为接近最优解,但并非所有最短路径生成树都接近最优解,图 2(d)中的生成树实际上是图 2(a)拼接图的所有最短路径生成树中路由代价最小的。图 2(e)展示了以顶点 6 为根的最短路径生成树,其 AVGMRC 值就较大。图 2(f)为最小路由代价生成树,其能够较好地

逼近最优解。可见,最小生成树和以某点为根的最短路径生成树都接近最优解,但还不是使得全局误差最小的解。

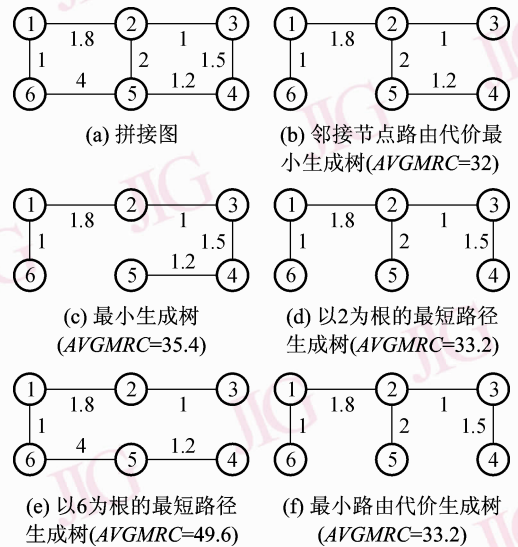


图 2 拼接图的邻接顶点路由代价及 4 种典型生成树

Fig. 2 AVGMRC and four typical spanning trees of mosaicing graph

需要考虑的第 2 个问题是拼接图中的边权重的选择。本文不打算讨论应该具体选择何种指标量作为边的权值,仅讨论作为权值的指标量所应该具有的特性。根据测量尺度,数据由粗到细可分为命名量(可区分)、次序量(可比较)、间隔量(可支持减运算)和比率量(可支持加减乘除等算术运算)^[29]等。在构造生成树时,如果仅仅需要对不同边进行比较,则边的权值为可比较的次序量或以上类型的值即可;如果是基于路径的代价来构造生成树,则边的权值就必须是有可累加的比率量。因此,显微图像拼接遵循的第 2 个原则是:在构造拼接图的生成树时,如果仅需对不同像对配准结果进行比较,则其边的权值可以是次序量、间隔量或者比率量;如果需要对边的权值进行累加,则边的权值必须是比率量。例如,构造图的最小生成树仅需要对不同像对的配准质量进行比较,则此时图像间配准的相似度就可以作为边的权值,由于构造图的最短路径生成树要涉及路径上边权值的累加,因此此时边的权值必须为具有明确可累加意义的比率量。

在大规模的图像拼接中,由于误差积累比较严重,因此需要尽量减少误差积累。因拼接图中边权值的计算具有不确定性,故所计算的值带有一定的

误差。如果两条路径其路由代价相近,那么边数较多的那条路径的误差积累一般更大。因此,所需遵循的第3个原则是,用基于路径的方法来构造拼接图时,在路径代价相近时,应该尽量减少参与路由的边的总数目。如图3所示,顶点3和4之间通过路径(3,4)与通过路径(3,2,1,4)的长度相同,因为后者包含了更多数目的边,其积累误差较大,此时应选择路径(3,4),以尽量减少累积误差。

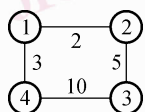


图3 通过选择边数较少的路径减少累积误差

Fig. 3 Reduces accumulated error by selecting path with fewer edges

以上所讨论的原则虽然主要是针对显微图像,但也适用于一般全景图的拼接方法。

3 局部图像配准与位置校正

3.1 基于分块-空间聚类的局部图像配准

图像配准是在参考图像中寻找基准图像中同名图块的过程。对于局部图像配准,在已有的图像匹配算法中,基于图像灰度相关性的模板匹配方法^[3]应用较广,但是该方法不能通过灰度相关系数来准确比较不同像对配准结果的准确性。

本文在分块匹配和空间聚类算法的基础上,提出一种改进的配准方法,这种方法可以用于评价配准质量,文献[30]中有关于该方法的详细讨论。分块匹配(block matching)方法主要用于运动估计、视频压缩与编码^[31]。空间聚类算法是数据挖掘中的一种重要方法,它将 n 个对象分为多个类,使得类的内部对象具有较高的相似度,而不同类中的对象的相似度则较低^[32]。

本文方法先将基准图分为 n 个子图块,记为 B_i ($i=1,2,\dots,n$),这种子图块为规则矩形区域,并覆盖基准图全部区域;然后采用灰度相关性算法分别将这些子图块在参考图上进行配准,以获得同名子图块在参考图与基准图上位置的位置差,即由各个子图块所计算的基准图在搜索图上的 n 个配准位置 $L(B_i)$ 。对于无变形无旋转图像的配准,在理想情况下,这些子图块都能够正确配准到参考图上,即灰度相关系数都为1,不仅 $L(B_i)$ 都相同,且都是正确

的配准位置,配准结果完全可信,也不存在误差。

实际上,由于各种原因,子图块最后计算的灰度相关系数小于1,且 $L(B_i)$ 不同。一般情况下,部分 $L(B_i)$ 往往集中分布在某一区域,而那些失配的点则无规律地分散分布。如果这些点全部分散或聚集于多个区域,则无法获得正确的配准结果。假定有10个子图块,对于点分布的情况可分为以下4种情况(如图4所示):(1)所有的点集中在某个区域,这说明配准完全成功(图4(a));(2)部分点集中在某个区域,其他点分散(图4(b)),这说明配准成功,但可信程度不如情况(1);(3)所有点都分散(图4(c)),这说明配准失败;(4)点在2个以上区域集中分布(图4(d)),这表明配准失败。

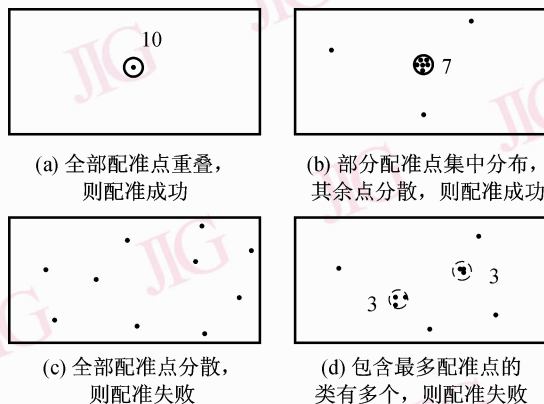


图4 配准点的4种分布情况

Fig. 4 Four cases of distribution of registration points

对于分块配准后所获得的多个位置点 $L(B_i)$,可采用空间聚类算法对这些点进行处理。在传统的空间聚类算法中,类的个数已经设定,而在处理配准点时,则无需也无法设定类的个数,而只需要设定最大类间距离 η 即可。开始聚类时,可将每个 $L(B_i)$ 作为一个类,首先获得中心点之间直线距离最短的类及其距离 $d_{\min}$,如果 $d_{\min} \leq \eta$,则合并这两个类,并进入下一次扫描,直到所有类间的距离都大于 η 。在图4(a)和图4(b)两种情况下,设包含配准点个数最多的类为 $C_{\max}$,其中心位置即为像对的配准位置,而在图4(c)和图4(d)两种情况下则判断配准失败。

像对间配准时,不仅要计算图像配准的位置,还要判断该配准位置是否可信,其可以采用可信度来度量。设分块配准时,基准图划分的子图块的个数为 n ,而类 $C_{\max}$ 所包含配准点的数目为 m ,则配准结

果的可信度 P 为

$$P = \frac{m}{n} \quad (4)$$

对于图 4(c) 和图 4(d) 两种情形,由于配准失败,无法获得图像的配准位置,因此在这两种情况下,配准位置的可信度为 0。对于图 4(a) 和图 4(b) 的情况,在进行空间聚类后,若 P 的值较大,则说明配准结果的正确程度高,该配准结果可信;反之,如果 P 值较小,则说明配准结果的正确程度低,该配准结果相对不太可信。

3.2 局部图像配准结果判断与位置校正

相邻图像间的配准完成后,还需要进一步判断配准位置的正确性,并在保证像对配准位置正确的基础上,提高配准位置的精确性。

在进行像对配准时,如果像对配准的可信度为 0,则说明该结果完全无法相信,即配准失败;如果其可信度达到 80% ~ 100%,则说明可以相信其配准位置的正确性。除此之外,还有少量可信度较低的像对配准结果,并不能够直接通过可信度来判断其配准位置是否正确或错误,还需要采用全局的拼接关系来进行验证,以使得在进行全景图像的生成时,避免由于选择了配准位置错误的像对配准关系而造成全局图像拼接的错误。设在像对配准时,对于一个可信度阈值 $\tilde{P}$,当可信度 $0 \leq P \leq \tilde{P}$ 时,像对配准位置的正确性需要验证,而当 $P > \tilde{P}$ 时,其配准位置正确。 $\tilde{P}$ 是一个经验值,其和分块的数量以及图像的整体质量有关。在医学显微图像的配准中,一般可以保守地取 $\tilde{P}$ 为 40%。

进行具体判断时,可以先在拼接图中寻找一条通过该边,且由最少数量正确边组成的环,然后从该环路上的任意定点开始,设其位置为 (x, y) ,通过对该环路进行位置变换到达该顶点时,所计算得到的位置为 $(\bar{x}, \bar{y})$,如果两点之间距离小于某个阈值 η ,则认为该边配准正确,否则认为配准错误。在判定所有像对配准正确与否后,如果拼接图不是连通的,则需要用户通过手工的方式建立这些子图之间的连接路径来形成连通图,同时赋予该边一定的可信度,并估计其平均误差。

判断拼接图中所有像对配准位置的正确性后,还可以对正确配准像对的结果进行精化。在进行像对配准时,为了获得较高的可信度,可将类间距离阈值 η 取得较大,以保证所计算的配准位置是正确

的,但是其精确性却难以保证。如果类 $C_{\max}$ 中的大部分点集中,而只有少量点较为分散,此时若取其平均值作为配准位置,则会降低配准位置的精确度。相比较而言,当类 $C_{\max}$ 中包含的配准点个数较少,但都重叠时,其配准位置反而更加精确。为了提高配准位置的精确性,可以取更小的类间阈值 $\tilde{\eta} < \eta$ 对类 $C_{\max}$ 中的点进行聚类,若能获得数量占优的类,则以该类的平均位置作为像对的配准位置 $l(\bar{x}, \bar{y})$ 。

3.3 拼接图中边权值的计算

在进行全景图像生成前,需要先选择合适的值作为拼接图中边的权值。边的权值的计算应符合第 2 节中所提出的原则 2 和原则 3。

一般以类 $C_{\max}$ 中各配准点到像对配准位置 $l(\bar{x}, \bar{y})$ 的平均误差 $\bar{E}$ 作为边的权值比较合理。设类 $C_{\max}$ 中配准点的坐标为 (x_i, y_i) ($i = 1, 2, \dots, m$),则平均误差为

$$\bar{E} = \frac{\sum_{i=1}^m \sqrt{(x_i - \bar{x})^2 + (y_i - \bar{y})^2}}{m} \quad (5)$$

但要考虑这样两种情况,即一种是可信度高而平均误差大(如图 5(a) 所示),另一种是可信度低而平均误差小(如图 5(b) 所示)。在这种情况下,可认为前者的配准结果比后者更加稳定,精确度也更高。

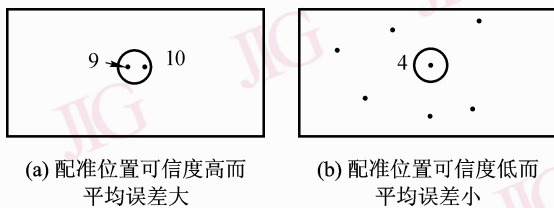


图 5 高可信度大误差和低可信度小误差配准结果的对比

Fig. 5 Comparison of registration results with high reliability

一般来说,对于同一像对的类 $C_{\max}$,其平均误差和可信度成反比关系,因此,可以采用平均误差与可信度的比值作为拼接图中边的权值,即

$$w = \frac{\bar{E}}{P} \quad (6)$$

在平均误差相同的情况下,那些可信度高的像对配准结果的精确度更高,当 $P = 0$,即像对配准错误时,则该边的权值为无穷大。

在像对配准时,其结果总存在一定的误差,而且

所计算的平均误差也是对这个误差的估计。当路径包含边的数量很大时,即使计算所获的路径长度为 0,也会存在累积误差,并且路径上包含边的数目越多,其累积误差也越大。因此,当两条路径具有相近的路径长度时,包含边数目较少的路径一般比包含边数目较多的路径误差小。控制这种积累误差的方法是在代价相同或相似的情况下,尽量使参与路由的边的数目较少。为此,可以设定类 $C_{\max}$ 中的每一个子图块的配准位置都存在常数误差 μ ,若将该误差考虑进来,则可将拼接图中边的权值修正为

$$w = \frac{\bar{E} + \mu}{P} \tag{7}$$

μ 的选择既要尽量使得生成树的路径所包含的边的总数量少,同时又不能过大,以免使得 μ 值对路径选择影响过大。

以修正后的误差值作为拼接图中边的权值,由于考虑了类 $C_{\max}$ 中各点的平均误差、可信度和常数误差 μ ,因此既可以进行比较运算,也可以进行累加运算,具有较为明确的物理意义,且可同时满足原则 2 和原则 3 的要求。

4 优化解选择与全局图像生成

4.1 几种拼接图生成树的比较

最小路由代价生成树^[26]是图的生成树中的一种。设 T 为图 G 的生成树,则顶点 u, v 在树 T 中的距离 $d_T(u, v)$ 即为顶点 u, v 之间的路由代价,而树 T 中的所有顶点间的路由代价之和即为树的路由代价,MRCT 是图 G 所有生成树中路由代价最小的树,其路由代价 $RC(G)$ 为

$$RC(G) = \min \left\{ \sum_{u, v \in V(G)} d_T(u, v) \right\} \tag{8}$$

求图 G 的最小路由生成树已被证明是 NPC 问题^[33]。

在第 2 部分已讨论过,拼接图的邻接节点最小路由代价生成树是全局拼接误差最小的生成树。下面证明该问题是一个 NPC (non-deterministic polynomial time completeness) 问题。图 G 的邻接节点最小路由代价生成树实际上是指定图中顶点对的集合,可用其求解使得这些顶点之间的路由代价之和最小的生成树。最小路由代价生成树是该树的一个特例,即它是求解使得所有顶点对的距离之和最小的生成树。根据文献[33],如果一个问题在加入

限制条件后是 NPC 问题,那么这个命题本身也是一个 NPC 问题。对于邻接节点最小路由代价生成树,当限制任意两个顶点之间相邻时,就是求解图的最小路由代价树的生成问题,由于图的最小路由代价树生成问题是一个 NPC 问题,因此求解图的邻接节点最小路由代价生成树也是一个 NPC 问题。

对于 $M \times N$ 大小的图,当 $M \times N$ 较大时,其生成树的个数呈指数级增长^[34];当行列数较少时,其生成树的数量也非常大,难以采用穷尽法进行搜索。表 1 是行列数较少时的拼接图生成树数目^[20]。

表 1 M 行 N 列拼接图的生成树数目

Tab. 1 Number of spanning trees of $M \times N$ graph

行列	1	2	3	4	5
1	0	1	1	1	1
2	1	4	15	56	209
3	1	15	192	2 415	30 305
4	1	56	2 415	100 352	4 140 081
5	1	209	30 305	4 140 081	5.6×10^8

通过上面分析可见,求解全局图像最优的生成树只能采用其他生成树算法来逼近:逼近时,首先比较几种常用的生成树,先考虑最小生成树,由于它仅考虑边的代价之和最小,是一种基于边的方法,其不但没有考虑路径,更没有考虑拼接图中相邻顶点在生成树中路由之和最小的问题,显然,这不是接近最优解的方法;再考虑最短路径生成树,它虽考虑了路径问题,但由于其仅考虑了某一个顶点与其他顶点之间的路由代价,因此即使是根与其他顶点之间路由代价之和最小的生成树也无法有效地逼近最优解。对于最小路由代价生成树,其在图的生成树中的所有顶点之间的路径之和最短,该树的邻接顶点的路由代价与邻接节点的最小路由代价生成树最为接近,这也较为接近第 2 节提出的第 1 个原则。

4.2 拼接图的最小路由代价生成树

由于图的最小路由代价树生成算法在网络设计、生物计算和交通设计等方面应用广泛,因此近年来也得到广泛的研究。目前研究的热点主要集中在逼近程度较高的近似算法上。第 1 个常数比近似 (constant ratio approximation) 算法是通过构造最短路径生成树来逼近图的最小路由代价生成树,可以获得 2 近似 (2-approximation) 的最小路由代价生成树^[35]。通过图的度量闭包 (metric closure) 方法,文献[36]提出了一种 $(1 + \varepsilon)$ 近似的算法 ($\varepsilon > 0$),并

且证明该算法的时间复杂度为 $O(n^{2 \times \text{ceil}(2/\varepsilon) - 2})$, 其中 $\text{ceil}(2/\varepsilon)$ 表示不小于 $2/\varepsilon$ 的最小整数。图 $G(V, E, w)$ 的度量闭包 $\hat{G}(V, V \times V, \hat{w})$ 是一个完全图, 且对于任意顶点 $u, v \in V$, 有 $\hat{w} = d_G(u, v)$, 即度量闭包中每条边的权值为该边两个顶点在图 G 中的最短路径长度。此外, 也有一些关于最小路由代价生成树的具体算法的研究^[37]。关于最小路由代价生成树及其生成算法, 在文献[26]中有系统的介绍。

设显微图像拼接图 $G(V, E, w)$ 的大小为 M 行 N 列, 其中 V 为显微图像集, E 为相邻图像的配准关系集, 且仅同行相邻列或同列相同行的图像之间才有邻接关系, 对于那些与失配像对对应的边, 如果没有经过手工校正, 则认为它们之间的误差为无限大。

对于 M 行 N 列的显微图像, 共有图像 $M \times N$ 幅, 仅同行相邻列或者同列相邻行之间重叠, 其中具有配准关系的边有 $2 \times M \times N - M - N$ 条(包括配准失败的边), 这就确定了一个拼接图 G 。连接图中, 顶点集 $V(G)$ 的生成树所需要的边的数目为 $M \times N - 1$, 而其余的 $M \times N - M - N + 1$ 条边(包括配准失败的边)都是冗余的。通过最小路由代价生成树算法, 从 $2 \times M \times N - M - N$ 条边中选择 $M \times N - 1$ 条边就可以得到拼接质量较高的全局图。

求解图的最小路由代价生成树算法主要是通过图 G 的度量闭包 $\hat{G}$ 来构造 k -star, 并寻找最优 k -star, k -star 是最多拥有 k 个非叶子顶点的树, 最优 k -star 是图 $\hat{G}$ 中路由代价最小的 k -star。由于图 $\hat{G}$ 的生成树可以方便地转换为图 G 中对应的生成树, 且图 $\hat{G}$ 与图 G 的最小路由代价相等, 因此找到图 $\hat{G}$ 的最优 k -star, 就找到了图 G 的最小路由代价生成树及最小路由代价。在寻找图 $\hat{G}$ 的最小路由代价生成树算法中, 还用到了 Prüfer 序列来求解一个完全图的所有生成树。对于一个包含 n 个顶点的图 $\hat{G}$, 其顶点编号依次为 $1, 2, \dots, n$, Prüfer 序列是一个长度为 $n-2$ 的数字序列, 数字序列中的数可以取 1 到 n 的任意整数, 并且可以重复, 对于 n , 其 Prüfer 序列的个数为 n^{n-2} 。对于顶点数为 n 的完全图 $\hat{G}$, 由于长度为 $n-2$ 的 Prüfer 序列与该图的生成树一一对应, 因此顶点数为 n 的完全图, 其生成树的个数为 n^{n-2} 。Prüfer 解码算法可以根据一个 Prüfer 序列来生成图 $\hat{G}$ 的一个生成树。

限于篇幅, 下面列出 M 行 N 列显微图像拼接图 $G(V, E, w)$ 满足 $\alpha \in (1, 2]$ 近似的最小路由代价生

成树算法的主要步骤如下:

(1) 计算 k 值, k 为不小于 $(3 - \alpha)/(\alpha - 1)$ 的最小整数;

(2) 构造图 G 的度量闭包 $\hat{G}(V, V \times V, \hat{w})$;

(3) 遍取图 $\hat{G}$ 中的 k 个顶点组合

① 以此 k 个顶点构成图 $\hat{G}$ 的全连通子图 $\tilde{G}$, 其边的权重为图 $\hat{G}$ 中对应边的权重;

② 对图 $\tilde{G}$ 中的顶点依次重新编号为 $1, 2, \dots, k$, 先通过 Prüfer 编码生成图 $\tilde{G}$ 的所有生成树, 然后对于每一个生成树, 尝试将图 $\hat{G}$ 中其他的 $n - k$ 个顶点指派给图 $\tilde{G}$ 中的 k 个顶点, 以构成图 $\hat{G}$ 的一个生成树, 最后计算其路由代价, 并记录路由代价最小的生成树;

(4) 取路由代价最小的树, 并转换成与图 G 对应的生成树, 这个树就是所求的最小路由代价生成树。

4.3 显微图像重叠区域的平滑过渡

显微图像采集时, 往往因为光线明暗不均, 致使拼接后, 重叠处的拼接痕迹明显。为了提高拼接效果, 在多幅图像的重叠处应进行过渡处理, 使得重叠区域过渡更加平滑, 视觉效果更好。

过渡处理应该取得渐变的效果, 即从一幅图像向另外一幅图像过渡时, 前幅图像像素的 RGB 值在整体图像中所占的比例应逐渐减少, 而后幅图像所占的比例则逐渐增加, 即若图像上某点距离该幅图像中心点的距离越近, 则其在整体图像的 RGB 值中所占的比例越高; 若距离越远, 则其在整体图像的 RGB 值中所占的比例越低。

实际计算中, 图像中各像素的 RGB 权值为该点距中心点的直线距离加上某个常数的倒数。在本文中, 图像中 i 行 j 列的 RGB 权值为

$$\omega = \frac{1}{0.5 + \sqrt{(i - y_c)^2 + (j - x_c)^2}} \quad (9)$$

其中, (x_c, y_c) 为图像中心点的坐标。

设整体图像中某点与 n 幅图像相交, 第 i 幅图像与该位置重合点的颜色值为 $C_i(r, g, b)$, 且在该幅图像中对应的权值为 ω_i , 则该点的颜色值为

$$C(r, g, b) = \frac{\sum_{i=1}^n C_i(r, g, b) \times \omega_i}{\sum_{i=1}^n \omega_i} \quad (10)$$

经过渐变处理, 不仅图像间的过渡更加自然, 而

且整体图像也可取得较好的视觉效果。

5 实验结果

采用 VC++ 6.0 实现了本文算法,其中灰度相关性的模板匹配算法部分借鉴了文献[38]中的部分代码。为了验证本文算法的效果,采用近百个切片的显微图像进行了拼接实验,实验中图像的大小为 $1\,600 \times 1\,200$ pixels,同行相邻列的横向搜索范围为 $8\% \sim 30\%$,纵向搜索范围为 $-10\% \sim 10\%$,同列相邻行的纵向搜索范围为 $8\% \sim 30\%$,横向搜索范围为 $-10\% \sim 10\%$ 。在计算中,分块-空间聚类配准中的分块数为 10,类间阈值 η 和 $\tilde{\eta}$ 分别为 10 和 4,常数误差 μ 为 0.5。

这些显微图像经 40 倍放大后,图像数目多达几百幅,经过拼接后,由于能够较好地解决积累误差问

题,从而获得了整体误差较小的高质量整体图像。

限于图幅,实验部分仅讨论一个切片经 40 倍放大后的 22×17 个序列图像的拼接。图像共有 374 幅,邻接拼接关系有 709 个。由于该切片图像中的配准区域的空白较多,并且部分配准区域还存在模糊等情况,因此所采集图像的质量较差。

像对配准结果中,有 600 对像对配准正确,像对配准结果的正确率达到 84.63%,失配多半是因为存在较多空白图像所致。

在进行像对配准的基础上,再分别采用完全局部的选择方法、最小生成树、任意选择根的最短路径生成树和 2-star 最小路由代价生成树 4 种方法进行边的选择。其效果分别如图 6、图 7、图 8 和图 9 所示,为了更好地观察拼接错位的情况,重叠区域没有进行平滑过渡处理。

通过比较这 4 种方法最后生成的拼接图像可以

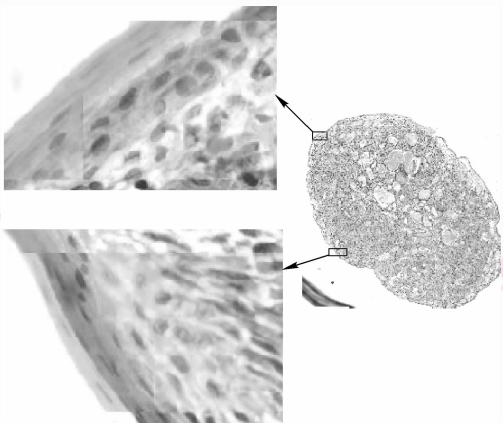


图 6 采用局部拼接方法的拼接效果图
Fig. 6 Panoramic image based on local mosaicing

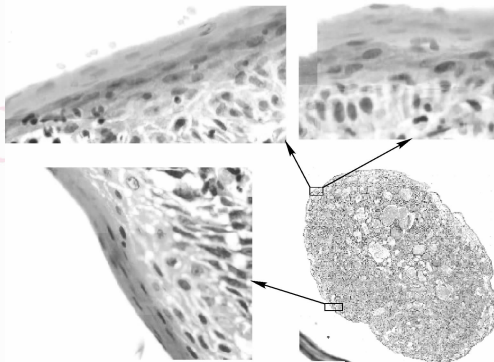


图 7 基于最小生成树的拼接方法的拼接效果图
Fig. 7 Panoramic image based on MCST

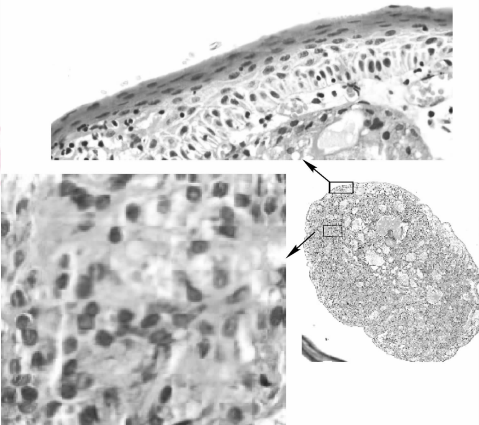


图 8 基于最短路径生成树的拼接方法的拼接效果图
Fig. 8 Panoramic image based on SPST

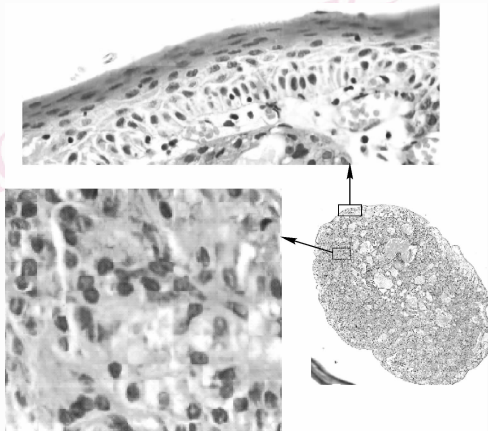


图 9 基于最小路由代价生成树的拼接方法的拼接效果图
Fig. 9 Panoramic image based on MRST

看到,完全局部拼接方法的拼接效果最差,其中有很多地方出现了错位的情况,图6仅显示了其中小部分。基于最小生成树的全景图像的拼接效果明显改善,但仍然存在少量明显错位的情况,图7的上侧两幅图像显示了两个明显错位区域的局部放大图,而左下侧的图则是拼接效果较好区域的局部放大图。基于最短路径生成树的拼接方法所生成的全景图像中已经没有明显的错位情况(如图8上侧的一幅局部放大图所示),但在部分区域仍然存在很微弱的错位,并造成最后全景图像的轻微模糊(如图8左下侧的一幅局部放大图所示)。如图9所示,基于最小路由代价生成树方法所生成的全景图不仅没有明显的错位,仔细比较图9左下侧的一幅局部放大图和图8左下侧的一幅局部放大图可以看出,对细微的错位造成的轻微模糊也有明显改善。

6 结 论

针对大规模显微图像拼接中存在的问题,提出了拼接图的概念和获得优化全景图的3个原则。在像对配准方面,提出了分块-空间聚类配准算法,该方法不仅可以获得像对间的配准位置,还可以对配准结果进行比较;在大规模图像拼接方面,提出了基于最小路由代价生成树的拼接方法。实验表明,当图像较多时,基于最小路由代价的拼接方法比其他方法具有更好的效果。

本文方法主要针对显微图像的全景图生成,但对于其他的大规模图像的拼接也具有一定的启发作用。

对于大规模显微图像拼接,采用最小路由代价生成树是拼接图的邻接节点最小路由代价生成树的一种近似,可见拼接图的邻接节点最小路由代价生成树的生成算法是将来研究的一个方向;当节点数目较大、要求精度较高时,目前的最小路由代价生成树生成算法的时间复杂度较高,因此提高最小路由代价生成树的计算效率是下一步的研究方向之一;此外,如何将最小路由代价生成树应用于不规则排列的大规模图像拼接,也是下一步的工作内容。

参考文献 (References)

- Gledhill D, Tian Gui-yun, Taylor D, *et al.* Panoramic imaging—A review[J]. *Computers and Graphics*, 2003, **27**(3): 435-445.
- Zitova B, Flusser J. Image registration methods: A survey [J]. *Image and Vision Computing*, 2003, **21**(11): 977-1000.
- Brown L G. A survey of image registration techniques [J]. *ACM Computing Surveys*, 1992, **24**(4): 325-376.
- Chen S E. Quick-Time VR—An image-based approach to virtual environment navigation [A]. In: *Proceedings of the 22nd Annual Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques [C]*, Los Angeles, CA, USA, 1995: 29-38.
- Škerl D, Likar B, Pernuš F. A protocol for evaluation of similarity measures for rigid registration [J]. *IEEE Transactions on Medical Imaging*, 2006, **25**(6): 779-791.
- Thévenaz P, Ruttimann U E, Unser M. A pyramid approach to sub-pixel registration based on intensity [J]. *IEEE Transactions on Image Processing*, 1998, **7**(1): 27-41.
- Xu P, Yao D Z. A study on medical image registration by mutual information with pyramid data structure [J]. *Computers in Biology and Medicine*, 2007, **37**(3): 320-327.
- Barnea D I, Silverman H F. A class of algorithms for fast digital image registration [J]. *IEEE Transactions on Computer*, 1972, **21**(2): 179-186.
- Kim D H, Yoon Y I, Choi J S. An efficient method to build panoramic image mosaics [J]. *Pattern Recognition Letters*, 2003, **24**(14): 2421-2429.
- Kang S B, Weiss R. Characterization of errors in compositing panoramic images [J]. *Computer Vision and Image Understanding*, 1999, **73**(2): 269-280.
- McLauchlan P F, Jaenicke A. Image mosaicing using sequential bundle adjustment [J]. *Image and Vision Computing*, 2002, **20**(9): 751-759.
- Xiong Y, Turkowski K. Registration, calibration and blending in creating high quality panoramas [A]. In: *Proceedings of the 4th IEEE Workshop on Applications of Computer Vision [C]*, Princeton, New Jersey, USA, 1998: 69-74.
- Hsu S, Sawhney H S, Kumar R. Automated mosaics via topology inference [J]. *IEEE Computer Graphics and Applications*, 2002, **22**(2): 44-54.
- Szeliski R, Shum H Y. Creating full view panoramic image mosaics and environment maps [A]. In: *Proceedings of the 24th Annual Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques [C]*, Atlanta, Georgia, USA, 1997: 251-257.
- Park J S, Chang D H, Park S G. Automatic generation of photo-realistic mosaic image [A]. In: *Proceedings of 1st IEEE International Workshop on Biologically Motivated Computer Vision [C]*, Seoul, Korea, 2000: 243-252.
- Davis J. Mosaics of scenes with moving objects [A]. In: *IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition [C]*, Santa Barbara, California, USA, 1998: 354-360.
- Shum H Y, Szeliski R. Systems and experiment paper: Construction of panoramic image mosaics with global and local alignment [J]. *International Journal of Computer Vision*, 2000, **36**(2): 101-130.
- Zhou H. Graph-based global optimization for the registration of a set of images [A]. In: *Advances in Image and Video Technology [C]*,

- Heidelberg, Berlin: Springer, 2006: 1206-1214.
- 19 Choe T E, Cohen I. Registration of multimodal fluoresce in images sequence of the retina [A]. In: Proceedings of the 10th IEEE International Conference on Computer Vision [C], Beijing, China, 2005, **1**: 106-113.
- 20 Nikolaidis N, Pitas I. Computationally efficient image mosaicing using spanning tree representations [A]. In: Proceedings of the 10th Panhellenic Conference on Informatics [C], Volas, Greece, 2005: 716-724.
- 21 Thomas H C, Charles E L, Ronald L R, *et al.* Introduction to Algorithms (Second Edition) [M]. Cambridge, MA, USA: MIT Press, 2001.
- 22 Sawhney H S, Hsu S, Kumar R. Robust video mosaicing through topology inference and local to global alignment [A]. In: Proceedings of the 5th European Conference on Computer Vision [C], Freiburg, Germany, 1998, **11**: 103-119.
- 23 Kang E Y, Cohen I, Medioni G. A graph-based global registration for 2D mosaics [A]. In: Proceedings of the 15th International Conference on Pattern Recognition [C], Barcelona, Catalonia, Spain, 2000: 257-260.
- 24 Kim D W, Hong K S. Fast global registration for image mosaicing [A]. In: Proceedings of the International Conference on Image Processing [C], Barcelona, Catalonia, Spain, 2003, **11**: 295-298.
- 25 Marzotto R, Fusiello A, Murino V. High resolution video mosaicing with global alignment [A]. In: Proceedings of the 2004 IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition [C], Washington, DC, USA, 2004, **1**: 692-698.
- 26 Wu B Y, Chao K M. Spanning Trees and Optimization Problems [M]. New York, USA: Chapman & Hall/CRC, 2003: 41-84.
- 27 Choe T E, Cohen I, Lee M, *et al.* Optimal global mosaic generation from retinal images [A]. In: Proceedings of the 18th International Conference on Pattern Recognition [C], Hong Kong, China, 2006: 681-684.
- 28 Zhang P, Milios E E, Gu J. Graph-based automatic consistent image mosaicking [A]. In: Proceedings of the 2004 IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics [C], Shenyang, China, 2004: 558-563.
- 29 Wu Lu, Liu Yu, Zhang Jing, *et al.* Geographical Information System: Theory, Methods and Applications [M]. Beijing: Science Press, 2001: 95-96. [邹伦, 刘瑜, 张晶等. 地理信息系统原理、方法及应用 [M]. 北京: 科学出版社, 2001: 95-96.]
- 30 Gong Yong-xi, Liu Yu, Xie Yu-bo, *et al.* Image registration algorithm based on blocking-spatial clustering [J]. Computer Engineering and Applications, 2007, **43**(29): 53-55. [龚咏喜, 刘瑜, 谢玉波等. 基于分块-空间聚类的图像配准算法 [J]. 计算机工程与应用, 2007, **43**(29): 53-55.]
- 31 Huang Y W, Chen C Y, Tsai C H. Survey on block matching motion estimation algorithms and architectures with new results [J]. Journal of VLSI Signal Processing, 2006, **42**(3): 297-320.
- 32 Han J, Kamber M. Data Mining: Concepts and Techniques [M]. Beijing: China Machine Press, 2001: 223-262. [Han J, Kamber M. 数据挖掘: 概念与技术 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2001: 223-262.]
- 33 Garey M R & Johnson D S. Computer and Intractability: A Guide to the Theory of NP-Completeness [M]. New York, USA: Freeman, 1979.
- 34 Wu F Y. Number of spanning trees on a lattice [J]. Journal of Physics A: Mathematical and General, 1977, **10**(6): L113-L115.
- 35 Wong R. Worst-case analysis of network design problem heuristics [J]. SIAM Journal on Algebraic and Discrete Methods, 1980, **1**(1): 51-63.
- 36 Wu B Y, Lancia G, Bafna V, *et al.* A polynomial-time approximation scheme for minimum routing cost spanning tree [J]. SIAM Society for Industrial and Applied Mathematics Journal on Computing, 1999, **29**(3): 761-778.
- 37 Fischetti M, Lancia G, Serafini P. Exact algorithms for minimum routing cost trees [J]. Networks, 2002, **39**(3): 161-173.
- 38 He Bin, Ma Tian-yu, Wang Yun-jian, *et al.* Visual C++ Digital Image Processing (2nd edition) [M]. Beijing: Posts & Telecommunication Press, 2002: 491-508. [何斌, 马天予, 王运坚等著. Visual C++ 数字图像处理(第二版) [M]. 北京: 人民邮电出版社, 2002: 491-508.]