

面向瓦片金字塔的层深确定与投影变换方法

李建勋^{1*}, 郭莲丽¹, 李 杨², 孙 霄²

(1. 西安理工大学 经济与管理学院, 西安 710048; 2. 西安理工大学 水资源研究所, 西安 710048)

(* 通信作者电子邮箱 jxli@xaut.edu.cn)

摘要: 为了提高瓦片金字塔变换效率, 结合数字地球的视域模型, 建立一个 15 参数的四次多项式投影变换方法, 从理论上探讨瓦片大小选择的影响因素, 给出瓦片大小和瓦片金字塔层深的优化方法, 并且采用 JOGL 构建一个基础数字地球环境 BDE2 对算法进行测试。分析与实验结果显示: 该算法构建的像素精度为 10 m 的瓦片金字塔层深仅为 10, 投影变换误差未超过 5×10^{-5} , 且算法复杂度低、拼接紧密、清晰度高、失真小, 能够有效地避免变换后影像的拼接裂缝和特征失真。

关键词: 瓦片金字塔; 数字地球; 投影变换; 视域模型; 多项式变换

中图分类号: TP399 **文献标志码:** A

Layer depth determination and projection transformation method oriented to tile-pyramid

LI Jianxun^{1*}, GUO Lianli¹, LI Yang², SUN Xiao²

(1. College of Economics and Management, Xi'an University of Technology, Xi'an Shaanxi 710048, China;

2. Water Resources Research Institute, Xi'an University of Technology, Xi'an Shaanxi 710048, China)

Abstract: In order to improve the transformation efficiency of tile-pyramid image, a 15-parameter projection transformation method was established by quartic polynomial based on the view model of digital earth. The influencing factors for selecting the size of tile image were discussed theoretically, and an optimization method to determine the size and depth of tile-pyramid was given. To test this algorithm, a basic digital earth environment BDE2 was constructed by adopting JOGL. The analysis and experimental results show that tile-pyramid in 10 m pixel accuracy constructed by this algorithm only has 10 layers and less than 5×10^{-5} average error; meanwhile, the proposed algorithm has low complexity, close stitching, high definition and low distortion, and can effectively avoid stitch cracks and characteristics distortion after the image is transformed.

Key words: tile-pyramid; digital earth; projection transformation; view model; polynomial transform

0 引言

数字地球是构筑在全球网络空间之上的空间信息基础设施,其目标是在全球统一的时空框架下,实现广泛来源的、多维的、海量的数据融合,透过网络提供高度数字化、拟人化和智能化的信息服务^[1,2]。瓦片金字塔作为实现数字地球的技术基础之一受到了学者们的高度关注^[3]。近年来,人们已经利用高分辨率的海量地理数据影像与地理高程信息,将遥感影像、数字高程模型(Digital Elevation Model, DEM)等地理信息数据返回到真实的球面上显示,实现了地面飞行、MODIS 灾害捕捉、全球气温监视等功能。但由于各种影像资料、空间地理信息、数字高程的数据量巨大,投影方式多样化等原因,现有瓦片金字塔生成技术中的部分算法环节在一定程度上限制了空间影像的进一步应用,严重影响了以数字地球为基础的虚拟现实、模拟仿真和动态演进等技术的发展。其主要体现在:1)瓦片金字塔层深和瓦片大小主要依靠应用需求确定,缺乏理论指导,没有明确的选择方案;2)影像投影变化精度不高,常出现外框形变、内部实体失真等问题。

为此,本文在瓦片金字塔模型的基础上,从理论上探讨了

影响瓦片大小选择的因素,给出了一个合理的瓦片大小和金字塔层深的确定方法;通过对地图投影的分析,提出了一个 15 参数的四次多项式投影变换方法,解决了影像变换后常见的拼接裂缝、内部失真等问题。最后,采用 J2EE 结合 JOGL、JUnit 技术,构建了一个基础数字地球环境,对投影变换算法进行了评测,就实验结果及目前示范应用情况来看,该算法更好地保留了影像的矩形边框和内部特征,且整体未出现变形或失真。

1 视域内瓦片大小及层深确定

瓦片金字塔所提供的分层数据管理技术,可以轻松胜任海量地理数据的组织管理,并容易实现与数据内容、显示区域无关的多分辨率流畅显示^[4]。然而这些性能的实现则主要依赖于瓦片金字塔生成算法以及瓦片金字塔各属性、元素的合理设定。但在当前开展的瓦片影像技术研究中,通常仅根据系统分辨率和影像应用时的幅度需求来对瓦片进行规范,均未从理论角度给出瓦片大小和层深的选择方法。为此,本文基于瓦片金字塔在构造数字地球时的视域框架,建立了一个瓦片展示模型,并通过该模型讨论了瓦片大小的选择因素,

收稿日期: 2014-04-10; **修回日期:** 2014-06-23。 **基金项目:** “十二五”国家水体污染控制与治理重大专项(2012ZX07201-006); 国家自然科学基金资助项目(51109177); 陕西省自然科学基金基础研究计划项目(2014JM9365)。

作者简介: 李建勋(1977-),男,陕西乾县人,副教授,博士,主要研究方向:决策支持系统、水利信息化; 郭莲丽(1978-),女,陕西西安人,博士研究生,主要研究方向:管理科学与工程; 李杨(1989-),男,陕西咸阳人,硕士研究生,主要研究方向:数字地球; 孙霄(1989-),女,陕西西安人,硕士研究生,主要研究方向:水利信息化。

为瓦片金字塔中瓦片大小和层深的设定提供一个优化方法。

设在视域框架中,视域的宽和高分别为 W, H , 瓦片的宽、高分别为 w, h , 考虑到为了提高响应速度而预留的瓦片数量, 则用来在视域内展示的瓦片影像有 $W/w + 2$ 列、 $H/h + 2$ 行, 如图1中带“*”号的瓦片所示, 共计为 N 个, $N = (W/w + 2)(H/h + 2)$ 。

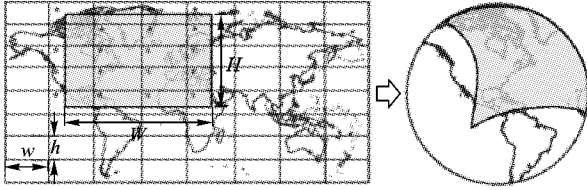


图1 瓦片金字塔构造数据地球的视域框架

若设影像传输速率均值为 v , 影像压缩率为 p , 每个瓦片的空间检索、显示过程花费的时间总和为 r , 且给出四个假设: 1) 在空间影像应用中, 影像传输速率均值 v 在间距不大的时间区段内为稳定; 2) 所有瓦片影像压缩率 p 恒定; 3) 每个瓦片在压缩后存入瓦片金字塔前, 均采用 24 位位图存储, 以完整保留原始影像信息; 4) r 通常仅与空间索引算法、系统显示性能相关, 受瓦片属性的影响极小。根据以上设定可知, 每个瓦片影像的大小为 $8^3 whp$, 且其在一个时间段 $[a, b]$ 中的传输耗时为固定值 $8^3 whp/v$, 因此每个瓦片影像总耗时可用 $t = 8^3 whp/v + r$ 表示。据此可知, 在时间段 $[a, b]$ 内进行视域展示的总耗时 T 为:

$$T = Nt = (W/w + 2)(H/h + 2)(8^3 whp/v + r) \quad (1)$$

系统最优的选择方案则是总耗时 T 最小时的 w, h 的取值, 故有:

$$\frac{\partial T}{\partial w} = 2^{11} hp/v + 2^{10} Hp/v - 2Wr/w^2 - WHr/w^2 h = 0 \quad (2)$$

$$\frac{\partial T}{\partial h} = 2^{11} wp/v + 2^{10} \times Wp/v - 2Hr/h^2 - WHr/h^2 w = 0 \quad (3)$$

由式(2)、(3)可得:

$$\begin{cases} w^2 h = Wrv/(2^{10} p) \\ wh^2 = Hrv/(2^{10} p) \end{cases} \quad (4)$$

由于 W, H 为常量, 且时间段 $[a, b]$ 内 r, v, p 保持不变, 根据式(4)可知 W, H, r, v, p 所构成的恒定量, 在一定的时间内维持了 w^2 与 h 之间, 以及 w 与 h^2 之间存在的比例关系, 而且这种比例关系可以通过(4)简化为: $w/h = W/H$ 。这进一步说明了在最低时耗要求下, 瓦片影像的幅度大小仅受到视域长度和宽度的制约, 而并不受到传输速率、压缩率、空间检索等因素的影响。即在任何空间影像服务过程中, 瓦片影像长宽比应与视域长宽比相同, 才能保证系统具有更小的时耗。为了获得瓦片幅度的具体设定方法, 将其代入式(4)中可得:

$$\begin{cases} w = (W^2 rv/(2^{10} Hp))^{1/3} \\ h = (H^2 rv/(2^{10} Wp))^{1/3} \end{cases} \quad (5)$$

式(5)从理论角度明确给出了瓦片影像的幅度选择方案, 且无论是长度和宽度的设定都同时受到 W, H, r, v, p 五个因素的影响。当视域 $W = 800$ 像素、 $H = 600$ 像素, $r = 0.2$ s, $v = 250000$ b/s, 且瓦片影像采用 JPEG 存储, 压缩比 $p = 3\%$ 时, 则可得 $w = 137.580302$ 像素, $h = 103.1852265$ 像素, 取整后得 $w = 138$ 像素、 $h = 103$ 像素。由此可见, 在视域为通常的 800×600 时, 瓦片的大小设定为 138×103 则能够更好地提升瓦片金字塔的服务性能, 并且此时每瓦片影

像大小为 142 KB, 体积较小, 便于传输, 方便了将来基于 OGC (Open GIS Consortium) [5] 开展 Web 方式的多分辨率影像服务的研究。

在完成瓦片大小设定后, 瓦片金字塔层高可依靠两条规则来确定: 1) 瓦片金字塔的多分辨率服务存在两个端点(塔顶和塔底), 其分别对应于缩放互操作的终止点, 当达到塔顶仍需要缩小操作或达到塔底仍需要放大操作时, 系统将不再通过瓦片金字塔进行服务, 而仅是对已有的缓存影像的缩放处理; 2) 在瓦片金字塔从塔顶至塔底的服务过程中, 影像精度逐步增加, 直到瓦片影像的最高精度为止。若设影像精度为 d , 地球平均半径 R , 那么金字塔的层深 n 在经度和纬度方向需要满足:

$$2\pi R/(W/w)^n \leq d, \pi R/(H/h)^n \leq d \quad (6)$$

根据式(4)所规范的瓦片长度和宽度内在关系, 则只需要满足式(6)。当影像精度为 $d = 15$ m, 地球平均半径为 $R = 6371.004$ km, 可得 $n \geq 9.2465$, 故可取层深为 10。而仅根据应用需求而未从理论上优化所设定的塔深通常为 20, 这将至少产生 2.0×10^{11} 个冗余瓦片。

2 投影变换算法研究

瓦片金字塔的生成一般包含投影变换、影像拼接、影像缩放和影像切片四个步骤[6-7]。其中投影变换是对来自不同传感器的遥感影像按照地图投影方式将其转化到同一投影模型中, 以便于后期的影像处理和瓦片生成。在投影变换方面, 人们已经提出了反解变换法、正解变化法、综合变换法、数值-解析变换法、数值变换法共五种类型的转换算法。从数学模型来看, 前四种投影变换均需要知道原投影或新投影的投影方程, 否则将无法完成投影之间的对接。然而对于栅格结构的遥感影像数据来讲, 来自不同遥感技术的多幅影像的投影方程可能十分复杂或者难以确定, 且影像的每次投影转换都需要重采样, 损失了部分信息。如果投影之间坐标的差异越大, 这种信息损失越严重[8]。因此, 遥感影像的投影变换一般不转换为地理坐标, 而直接采用数值变换法进行多项式拟合运算[9]。

2.1 多项式拟合投影变换原理

设原投影点的直角坐标系为 x, y , 而新图投影点的直角坐标系为 X, Y , 根据射影几何原理, 则两投影之间坐标变换的基本方程可表示为: $X = F_1(x, y), Y = F_2(x, y)$, 其中 F_1, F_2 是两投影间的坐标变换函数[10]。数值变换法便是采用 n 次多项式对基本方程的一种逼近[11]:

$$\begin{cases} X = a_{00} + (a_{10}x + a_{01}y) + (a_{20}x^2 + a_{11}xy + a_{02}y^2) + \\ \quad (a_{30}x^3 + a_{21}x^2y + a_{12}xy^2 + a_{03}y^3) + \cdots + \\ \quad (a_{n0}x^n + a_{n-1,1}x^{n-1}y + \cdots + a_{1, n-1}xy^{n-1} + a_{0n}y^n) \\ Y = b_{00} + (b_{10}x + b_{01}y) + (b_{20}x^2 + b_{11}xy + b_{02}y^2) + \\ \quad (b_{30}x^3 + b_{21}x^2y + b_{12}xy^2 + b_{03}y^3) + \cdots + \\ \quad (b_{n0}x^n + b_{n-1,1}x^{n-1}y + \cdots + b_{1, n-1}xy^{n-1} + b_{0n}y^n) \end{cases} \quad (7)$$

其中 a_{ij} 和 b_{ij} 为 n 次逼近多项式的系数, 共计 $(n+1)(n+2)$ 个。若要求解式(7)中的系数 a_{ij} 和 b_{ij} , 则需要在两投影平面上各选定具有相同地理坐标的 $(n+1)(n+2)/2$ 个基准点, 依靠基准点分别求得每一对点的 (x_i, y_i) 和 (X_i, Y_i) 值, 然后使用消元法求解这两个投影之间的变换系数 a_{ij} 和 b_{ij} 。为便于

表述,此处将具有 $(n+1)(n+2)/2$ 个基准点的 n 次多项式逼近投影变换方法称为 $(n+1)(n+2)/2$ 参数 n 次多项式投影变换。根据多项式逼近的算法原理,影响该投影变换精度的因素主要有四个方面:多项式次数、影像幅度大小、瓦片经纬度跨度及基准点位置。其中多项式次数对精度影响较大,次数过小则逼近程度不够且误差大,而次数过高时则容易出现“抖动”现象,同时也增加了算法的复杂度。剩下的三个因素中,基准点的选择则是整个算法成败的关键。理论上来说,算法在除了基准点之外的其他点上或多或少地存在着误差,离基准点越近的点误差越小,离基准点越远的点误差越大。因而在投影变换时大多选用 10 参数的三次多项式进行逼近,并且要求基准点在整个转换地图范围内分布均匀。这种算法不但满足了遥感影像的多种投影方式变换的需要,避免了因投影方程难以获取而导致的变换困难,而且在一定程度上保证了影像精度,具有较低的算法难度。

2.2 15 参数四次多项式投影变换算法

对于瓦片金字塔来说,瓦片已不再单单是一幅以地图投影和空间信息为主的数字图像,而是一种具有特定属性的遥感影像,其对投影变换的要求更加严格:不但要求投影变换误差小,而且要求投影变换的应尽量保证矩形外框,以便于瓦片金字塔构造和多分辨率影像服务时的无缝接合。然而,在 10 参数的三次多项式投影变换算法中,基准点个数仅有 10 个。此时,若在瓦片矩形外框的四角放置基准点,内部放置 6 个基准点,如图 2 所示,则投影变换后虽然能够保证瓦片 BBOX (Bounding Box)^[12] 的正确转换,但可能出现边框线变形,造成瓦片应用时的拼接困难;而若在瓦片矩形外框的四角以及边线中点均放置基准点,如图 2 所示,则影像内部的基准点只有两个,则变换后将导致内部信息的较大失真。由此可见,在 10 参数的三次多项式投影变换算法中,保持边框外形和避免内部失真构成了一对不可调和的矛盾。为此,本文面向瓦片金字塔,在分析基准点构成的基础上,提出了一种四次多项式 15 参数的四次多项式投影变换改进方案。

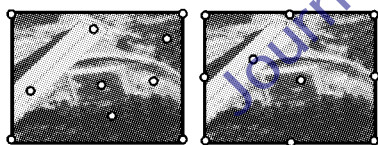


图2 三次多项式的基准点

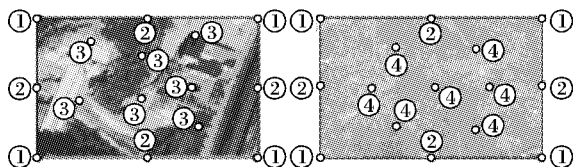


图3 影像中基准点的排布方法示例

在多项式逼近投影变换中,基准点的选择是影响算法精度的一个关键。那么设置多少个基准点并确定其合理位置,则是保证瓦片影像投影变换准确性的一个重要因素。为此,展开以下分析:1)四角点。对于瓦片来说 BBOX 界定了影像的所在区域以及经纬度跨度,如果 BBOX 得不到准确定位则投影变换后的瓦片影像将无法使用,因此瓦片矩形外框的四角必须设置基准点以准确定位 BBOX 的 minLongitude、minLatitude、maxLongitude、maxLatitude 四个元素。此处称这四个基准点为四角点,如图 3 中的①所示。2)边中点。四角点

虽然保证了投影变换后影像的经纬度定位,但瓦片的四条矩形外边线仍可能产生变形或扭曲,从而影响瓦片影像的无缝拼接,所以必须在四条外边线上设定基准点,以降低外边线变换后的误差。鉴于设置过多的基准点会提高多项式的次数,反而降低整体变换精度,故此处选择四条外边线的中点作为基准点,且称这四个基准点为边中点,如图 3 中的②所示。3)特征点。特征点是指瓦片影像中具有代表性特征的实体点位,其可以为特征点位附近的影像信息提供更好的变换效果,以提高瓦片投影变换后的质量,如图 3 中的③所示。由于四角点和边中点的设定已占据了 8 个基准点位,若采用 10 参数的三次多项式投影变换算法,则可用的特征点位仅有 2 个,已无法保证瓦片影像内部特征信息的准确性,因而必须提升多项式的次数以获得更多的基准点位,同时由于多项式的次数过高将引起“抖动”现象,故本文选择四次多项式逼近方法,其所具有的基准点共 15 个,可提供 7 个特征点位。4)均衡点。当瓦片影像特征不明显时,特征点的设定已失去意义,如果随机设定瓦片内部的基准点,则无法均衡瓦片内部误差以保证整体投影变换的精度。故在此时应将瓦片所在的矩形平面使用不规则三角网 (Triangulated Irregular Network, TIN) 进行合理划分,以均衡个三角内部的投影变换误差,提高整体变换的精度,如图 3 中的④所示。

综合以上关于四角点、边中点、特征点、均衡点的设定,瓦片影像的投影变换必须采用 15 参数的四次多项式投影变换算法,才能在保证瓦片矩形外框的同时减少内部信息的失真。同时对于一特定的瓦片来说,该算法已经固定地使用了 8 个基准点(四角点和边中点),那么如何合理地设定剩下的 7 个特征点或均衡点则是算法是否具有较高精度的关键。而这个问题的解决,可以结合影像特征提取算法和三角网方法来完成,由于该类算法已经成熟,且限于文章篇幅,此处不再赘述。

3 实验与分析

为了检验上述多分辨率瓦片金字塔生成的各部分算法效率以及各部分算法集成后的整体效果,使用 J2EE 结合 JOGL (Java Bindings for OpenGL),采用 NASA 的 BMNG (Blue Marble Next Generation) 影像数据构建了一个基础数字地球环境 BDE2,并将本文提出的投影变换算法应用到 BDE2 的瓦片金字塔生成过程中,进行了一系列对比实验;同时还将各算法以插件方式注入到 BDE2 中,开发等值线、测站标注、专题图等多个应用项目,以通过插件模式便捷地更换系统的内部算法,为整个生成算法结果的检验提供一个系统化环境。在该环境中,共产生瓦片金字塔 5 个:SRTM90 数字高程瓦片金字塔、BMNG 影像瓦片金字塔、高清影像瓦片金字塔、MODIS 影像瓦片金字塔、GIS 数据瓦片金字塔;瓦片大小 138×103 ,最小塔深 3 层,最高塔深 10 层,共计瓦片影像约 3.5×10^5 幅。

应用本文提出的 15 参数四次多项式的投影变换方法,以瓦片为单位对瓦片金字塔进行了投影变换,并每次随机地提取变换后瓦片影像中的 10000 个点,测量其经纬度,设经度或纬度实测值为 A ,算法所获得的变换值为 B ,则记录变换误差和变换误差比率分别为 e 和 r 。

$$\begin{cases} e = |A - B| \\ r = e/A \end{cases} \quad (8)$$

实验时,通过所有数据点误差比率的期望 $E(r)$ 和方差

$D(r)$ 来反映变换值的准确程度,并将其与 10 参数的三次多项式逼近方法的实验结果进行对比。经过对来自 QuickBird、SPOT、IKONOS 等影像的误差分析,如表 1 所示,发现本算法的误差至少比三次多项式逼近方法小一个数量级,其误差比率的方差 $D(r)$ 仅为三次多项式逼近法的 $1/30$,方差比率的期望 $E(r)$ 在 2×10^{-8} 左右,各种类型影像的误差值均不大于 3.5×10^{-5} 。为了验证所变换后的瓦片影像的实用性,还将部分实验结果构造成了 MODIS 瓦片金字塔和 Quick Bird 高清瓦片金字塔,在 BDE2 中的等值线应用过程中进行测试。结果表明,新的投影变化方法保留了影像的矩形边框和内部特征,且整体未出现变形或失真,满足了构建瓦片金字塔的需要。

表 1 不同投影算法精度的对比

遥感影像 类型	本文方法		10 参数方法	
	$E(r)$	$D(r)$	$E(r)$	$D(r)$
Quick Bird	0.5×10^{-8}	3.3×10^{-12}	1.3×10^{-6}	3.8×10^{-8}
SPOT	1.2×10^{-8}	5.8×10^{-12}	5.2×10^{-6}	6.6×10^{-8}
IKONOS	2.5×10^{-8}	7.9×10^{-12}	6.7×10^{-6}	9.0×10^{-8}
MODIS	1.3×10^{-8}	6.4×10^{-12}	7.1×10^{-6}	9.5×10^{-8}
AVHRR	2.9×10^{-8}	8.1×10^{-12}	9.2×10^{-6}	3.2×10^{-8}

理论上,任何一种多项式投影变换方法的精度将受到瓦片幅度大小、瓦片经纬度跨度,以及基准点的选择三方面因素的影响。以下将通过实验分析这些因素对 15 参数四次多项式投影变换方法的影响程度,以及确认其是否限定了算法的使用范围。

首先,探讨瓦片幅度大小的影响。在对 1310 幅瓦片的投影变换实验中,如图 4 所示,变换值的经度误差比率和纬度误差比率随着瓦片宽度和高度的增加而逐渐缓慢增加,在瓦片幅度为 1750 像素附近开始出现剧烈增幅,误差比率达到 1.63×10^{-7} ;若高清影像瓦片幅度超过 2100 像素则变换后的内部部分实体略显失真,但瓦片的外边框仍能保持矩形结构,在 BDE2 中未出现拼接缝隙。此处误差比率的增长主要由于瓦片幅度增大后基准点离散程度随之增大,进而降低了多项式逼近的精度所致。因此在大幅影像的投影变换时,应注意保证影像大小小于 2100 像素,以避免影像信息的丢失。而对瓦片金字塔来说,根据本文第 1 章视域内瓦片大小及层深确定的结论,瓦片大小受到视域大小的制约,且一般均不超过视域大小,因而受瓦片幅度的影响程度不大。

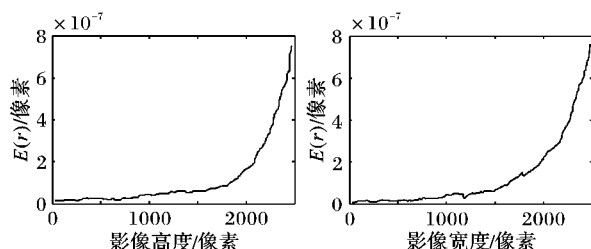


图 4 影像大小对算法精度的影响

然后,为了测试在瓦片幅度大小不变的情况下瓦片经纬度跨度对变换值的影响,分别使用 200 幅 256×256 、180 幅 128×128 、193 幅 64×64 的 Quick Bird 影像瓦片分三类进行实验,如图 5 所示。实验采用 JUnit 动态的生成每类影像的经纬度跨度,从 $1^\circ \times 1^\circ$ 到 $30^\circ \times 30^\circ$ 依次递增 0.01° 进行测试,每次记录误差的期望 $E(e)$ 。结果发现这三类影像均受到瓦片外框经纬度大小的影响,随着瓦片经纬度跨度的增大,误差期望值也逐渐

增大;且瓦片幅度越大,误差期望值增长的速度也越快;但各种影像的误差比率均趋于平缓,变化不明显, $E(e)$ 最大值也未超过 5×10^{-5} 。这说明,经纬度跨度大的影像不适合直接进行投影变换,应将原始影像分解成小跨度影像后进行,这正符合了在数字地球中影像金字塔进行瓦片化的思想。

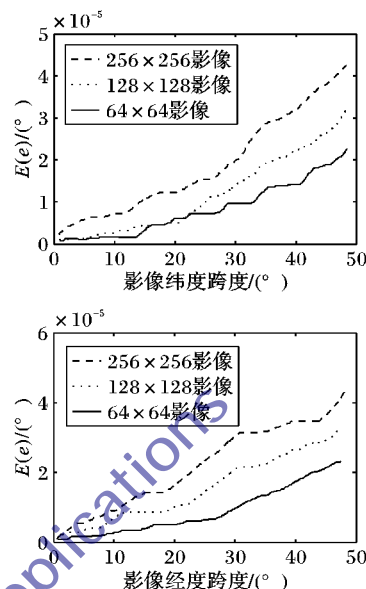


图 5 影像经纬度跨度对算法精度的影响

最后,在瓦片的幅度和经纬度跨度不变的情况下,分析基准点的选取因素。由于在基准点设定时,为了保证变换后影像的矩形外形,边框上固定了 8 个基准点位置,因此只能选取内部的 7 个基准点作为实验核心。实验选取瓦片幅度和经纬度跨度的组合方式进行测试,其瓦片幅度大小为 600×600 ,经纬度跨度大小为 $0.05^\circ \times 0.05^\circ$,以 7 个内部基准点之间距离的最大值 M 作为统计量,分析其对投影变换结果的影像。通过对 200 多幅影像的测试,发现误差比率的期望 $E(r)$ 随着 M 的增大出现震荡现象,震荡曲线外包络的趋势为线性增长,当 M 为较小的 20 时其 $E(r)$ 仅是 M 为 180 时的 $1/13$ 。可见,投影变换前应正确地选择基准点,从而在保留影像特征实体的同时尽可能缩短基准点之间的距离,避免由于人为因素而产生的误差。

4 结语

结合瓦片金字塔模型以及瓦片影像的定义,本文在数字地球视域框架基础上,探讨了金字塔瓦片的选择方法,并重点针对瓦片投影变换提出了一种 15 参数的四次多项式变换算法。文中所提出的一系列算法充分地考虑了数字地球的实现与应用,能够确保瓦片的矩形外形,并可以减小实体变形和影像失真,更好地满足了瓦片金字塔构建的需要。通过在基础数字地球环境 BDE2 中使用 JUnit 测试以及国家“863”示范应用的效果来看:所构建的 BMNG 影像、SRTM90 (Shuttle Radar Topography Mission) 数字高程、MODIS (MODerate-resolution Imaging Spectroradiometer) 影像、GIS 数据、高清影像五种瓦片金字塔,均具有复杂度低、精度高、访问效率高、拼接良好等特点,这为构建一个快速、高效的海量数字影像存储、访问环境提供了一个可借鉴方案。

(下转第 2707 页)

感兴趣区域进行更具针对性的清晰化处理,以满足实际需求,也具有的重要意义。下一步将继续完善该算法,并将其应用于实际视频去雾系统。

参考文献:

- [1] YU J, XU D, LIAO Q. Image defogging: a survey [J]. *Journal of Image and Graphics*, 2011, 16(9): 1561–1576. (禹晶, 徐东彬, 廖庆敏. 图像去雾技术研究进展[J]. 中国图象图形学报, 2011, 16(9): 1561–1576.)
- [2] AGAIAN S, ROOPAELI M. New haze removal scheme and novel measure of enhancement [C]// *Proceedings of the 2003 IEEE International Conference on Cybernetics*. Washington, DC: IEEE Computer Society, 2013: 219–224.
- [3] KIM J, KIM L, HWANG S H. An advanced contrast enhancement using partially overlapped sub-block histogram equalization [J]. *IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology*, 2001, 11(4): 475–484.
- [4] RAHMAN Z, JOBSON D, WOODDELL G. Retinex processing for automatic image enhancement [J]. *Journal of Electronic Imaging*, 2004, 13(1): 100–110.
- [5] TAN R T. Visibility in bad weather from a single image [C]// *Proceedings of the 2008 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*. Washington, DC: IEEE Computer Society, 2008: 1–8.
- [6] FATTAL R. Single image dehazing [J]. *ACM Transactions on Graphics*, 2008, 27(3): 1–9.
- [7] HE K, SUN J, TANG X. Single image haze removal using dark channel prior [J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2011, 33(12): 2341–2353.
- [8] HE K, SUN J, TANG X. Guide image filtering [J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2013, 35(6): 1–13.
- [9] TAREL J P, HAUTIN N. Fast visibility restoration from a single color or gray level image [C]// *Proceedings of the 2009 IEEE Conference on Computer Vision*. Washington, DC: IEEE Computer Society, 2009: 2201–2208.
- [10] XU H, GUO J, LIU Q, *et al.* Fast image dehazing using improved dark channel prior [C]// *Proceedings of the 2012 IEEE International Conference on Information Science and Technology*. Washington, DC: IEEE Computer Society, 2012: 663–667.
- [11] NARASIMHAN S G, NAVAR S K. Contrast restoration of weather degraded images [J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2003, 25(6): 713–724.
- [12] SHEIKH H R, ALAN C. Image information and visual quality [J]. *IEEE Transactions on Image Processing*, 2006, 15(2): 430–444.
- [13] ZHOU S, GENG N. Optimising dark channel prior-based single image haze removal technique [J]. *Computer Applications and Software*, 2013, 30(7): 287–289. (周首峰, 耿楠. 基于暗原色先验的单幅图像去雾方法的优化技术[J]. 计算机软与应用, 2013, 30(7): 287–289.)
- [14] FANG S, WANG F, ZHAN J, *et al.* Simultaneous dehazing and denoising of single hazing image [J]. *Pattern Recognition and Artificial Intelligence*, 2012, 25(1): 136–142. (方帅, 王峰, 占吉清, 等. 单幅雾天图像的同步去噪与复原[J]. 模式识别与人工智能, 2012, 25(1): 136–142.)
- [15] CHEN Z, SHEN J, PETER R. Single image defogging algorithm based on dark channel priority [J]. *Journal of Multimedia*, 2013, 8(4): 432–438.
- [16] ZHANG B, DAI S, SUN W. Fast image haze removal algorithm based on atmospheric scattering model [J]. *Journal of Image and Graphics*, 2013, 18(2): 184–188. (张冰冰, 戴声奎, 孙万源. 基于暗原色先验模型的快速去雾算法[J]. 中国图象图形学报, 2013, 18(2): 184–188.)
- [17] ZHOU W, BOVIK A C, SHEIKH H R, *et al.* Image quality assessment: from error visibility to structural similarity [J]. *IEEE Transactions on Image Processing*, 2004, 13(4): 600–612.

(上接第2686页)

参考文献:

- [1] ELMES G A, WEINER D, ALESSANDRO C D. Digital earth [M]. [S. l.]: *International Encyclopedia of Human Geography*, 2009: 198–204.
- [2] LECLERC Y, REDDY M, JVERSON L. Digital Earth: building the new world [C]// *VSM99: Proceedings of the 5th International Conference on Virtual Systems and Multimedia*. Dundee: [s. n.], 1999: 250–262.
- [3] MARIA F, GIULIANA R, GABRIELLA S B. Using resolution pyramids for watershed image segmentation [J]. *Image and Vision Computing*, 2007, 25(6): 1021–1031.
- [4] HUO L, YANG Y, LIU X. Research and practice of tiles pyramid model technology [J]. *Science of Surveying and Mapping*, 2012, 37(6): 144–146. (霍亮, 杨耀东, 刘小勇. 瓦片金字塔模型技术的研究与实践[J]. 测绘科学, 2012, 37(6): 144–146.)
- [5] ANTHONY M, CASTRONOVA J L, GOODALL M M. Models as Web services using the Open Geospatial Consortium (OGC) Web Processing Service (WPS) standard [J]. *Environmental Modelling & Software*, 2013, 31(3): 72–83.
- [6] SUN X, DUBOIS E. A novel algorithm to stitch multiple views in image mosaics [C]// *ICASSP '04: Proceedings of the IEEE 2004 International Conference on Acoustics Speech and Signal Processing*. Piscataway: IEEE, 2004, 3: 481–484.
- [7] LIU Q, MENG J. Raster dataset projection transform based on bilinear interpolation approximate grid algorithm [J]. *Engineering of Surveying and Mapping*, 2009, 18(5): 15–18. (刘庆元, 孟俊贞. 双线性插值今世网格的栅格数据投影变换[J]. 测绘工程, 2009, 18(5): 15–17.)
- [8] JIAO J, ZENG Q. Cartography [M]. Beijing: Peking University Press, 2005: 201–257. (焦健, 曾琪明. 地图学[M]. 北京: 北京大学出版社, 2005: 201–257.)
- [9] KRATKY V. Rigorous photogrammetric processing of SPOT images at CCM Canada [J]. *Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 1989, 44: 53–71.
- [10] OKAMOTO A. Orientation and construction of models, part III: mathematical basis of the orientation problem of one-dimensional central-perspective photographs [J]. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 1981, 47(12): 1739–1752.
- [11] KRATKY V. Online aspects of stereophotogrammetric processing of SPOT images [J]. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 1989, 55(3): 311–316.
- [12] LI J, SHEN B, GUO J, *et al.* Linear quadtree coding and features oriented to image pyramid [J]. *Journal of Computer Applications* 2011, 31(4): 1148–1151. (李建勋, 沈冰, 郭建华, 等. 面向影像金字塔的线性四叉树编码及其特性[J]. 计算机应用, 2011, 31(4): 1148–1151.)