

高精度曲面建模方法研究进展与分类

赵明伟^{1*}, 岳天祥²

(1. 滁州学院, 安徽省地理信息集成应用协同创新中心, 安徽 滁州 239000; 2. 中国科学院地理科学与资源研究所, 资源与环境信息系统国家重点实验室, 北京 100101)

摘要:高精度曲面建模方法(HASM)作为新一代的曲面模拟方法,经过20多年的发展,其理论体系不断完善,算法体系不断丰富,应用领域不断拓广。然而,目前HASM方法尚未建立科学的分类体系,仅依据求解算法为标准进行简单区分,忽视了HASM所研究问题本质上的差异,阻碍了HASM方法在相关领域的进一步应用。为此,本文在总结HASM方法发展过程的基础上,按照研究问题的本质特点,以输入数据的类型为依据,将HASM分为空间插值方法和空间数据融合方法。其中,HASM空间插值方法是根据离散采样点得到目标曲面,而HASM空间数据融合方法则是融合多源数据,并综合各个数据源优势而得到新曲面的过程。该分类科学、合理,为今后HASM方法的进一步应用提供了理论指导。最后本文叙述了应用两种HASM方法求解问题时的一般步骤,同时还对两种方法的发展前景进行了展望。

关键词:高精度曲面建模方法(HASM);精度;空间插值;数据融合;综述

1 引言

地面观测数据精度虽高,但离散的地面观测点无法计算区域尺度上的各种参数,因此空间插值方法是解决该问题的重要途径。以往的曲面建模方法或是基于地统计学理论,或是基于邻域相关性假设,或是弹性力学机制,而并非从曲面自身的要素出发考虑,在建模中没有考虑曲面的内蕴因素对曲面重建的约束作用,因此,在曲面拟合过程中难以控制建模误差。

基于曲面论的高精度曲面建模方法(HASM)是近几年发展起来的一种新的可用于空间插值和预测的方法(Yue, 2011)。基于Evans(1980)的研究,坡面、坡向和曲率是反映局部规律的重要变量,岳天祥等(1990)首先完成了基于曲线论的冰斗形态的数学模型,用来探测地球曲面系统的变化(Yue et al,

2002)。根据微分几何理论,空间曲线由曲率和挠率决定;曲面由第一类基本量和第二类基本量决定(Toponogov et al, 2006)。因此,曲面建模技术应更多地考虑曲面自身的决定因素。基于此,岳天祥等(2001, 2003)发展了基于曲面论的高精度曲面建模方法(HASM)。自2004年起,高精度曲面建模(HASM)理论体系日益完善,并解决了地理信息系统中的经典曲面建模的误差问题(Yue et al, 2007; Yue, Chen et al, 2010; Yue, Wang, 2010; Yue et al, 2012)。数值试验和实例验证都表明,HASM模拟精度高于经典的插值方法(Yue et al, 2007; Shi et al, 2009; Yue, Chen et al, 2010; Zhao et al, 2013)。

基于离散数据点进行空间插值,尽管HASM方法的精度显著优于经典插值方法,然而,许多问题仅仅依赖空间插值还是难以解决的。例如采样点过于稀疏、目标曲面剧烈变化等。遥感手段可以获

收稿日期:2015-10;修订日期:2016-01。

基金项目:国家自然科学基金创新群体项目(41421001);安徽省教育厅高校自然科学研究重点项目(KJ2016A536) [Foundation: Science Fund for Creative Research Groups of the National Natural Science Foundation of China, No.41421001; Key Project of Natural Science Research of Anhui Provincial Department of Education, No.KJ2016A536]。

作者简介:赵明伟(1986-),男,山东莱芜人,博士,讲师,主要研究方向为高精度曲面建模与环境生态信息学,

E-mail: zhaomw@lreis.ac.cn。

引用格式:赵明伟,岳天祥. 2016. 高精度曲面建模方法研究进展与分类[J]. 地理科学进展, 35(4): 401-408. [Zhao M W, Yue T X. 2016. Classification of high accuracy surface modeling (HASM) methods and their recent developments[J]. Progress in Geography, 35(4): 401-408.]. DOI: 10.18306/dlkxjz.2016.04.001

取区域尺度上的观测数据,为解决上述问题提供了数据源,但是目前遥感数据的精度还有待进一步提高。相关学者对遥感数据的融合和增强进行了研究,提出了多种遥感数据融合模型。如利用不同时相的影像数据进行配准生成DEM(Schultz et al, 1999; Palubinskas et al, 2010; Okano et al, 2011);利用ASTER DEMs、GTOPO30、数字地图数据、地面测量数据等多源数据实现SRTM DEM空值区域的填补(游松财等, 2005; 凌峰等, 2006; Luedeling et al, 2007; Reuter et al, 2007);也有学者采用时间、区域基本一致的不同DEM进行融合(Karkee et al, 2008)。从融合方法看,主要方法有自一致性技术(Schultz et al, 1999)、快速傅里叶变换(Karkee, 2008; 陈传法等, 2010)、稀疏表示(Papasaiika et al, 2011)、卡尔曼滤波(Slatton et al, 2002)等。这些方法基于不同来源DEM数据进行融合,其精度受限于原始DEM数据的精度,因而难以得到本质上的改善。岳天祥等(1990)提出基于HASM方法实现地面观测数据和卫星遥感数据的融合思想,将地面观测数据的精度优势和卫星遥感数据覆盖区域的特点结合起来,得到既能覆盖研究区域、又能显著提高精度的表面模型,这是HASM关于数据融合的思想的初始阶段。

基于这种思想,Zhao M W等(2014)对中国森林植被碳储量空间分布进行模拟,表明无论是在精度还是空间分布特征上,HASM方法的融合结果都显著优于直接采用离散采样点进行空间插值的结果。显然,已经不能将HASM仅仅看作是一种空间插值方法,如何定义HASM方法成为一个亟需解决的问题。

HASM从提出至今,应用领域不断拓广,但针对不同问题,HASM方法的应用并不是完全相同的。由于没有科学的定义和分类指导,这种差异造成了一种混乱,使得用户在解决具体问题时,难以准确快速的确定应用方案,这对HASM方法自身的发展也是不利的。本文在总结HASM发展过程的基础上,对其进行科学定义和分类,论述了分类后的HASM方法的求解过程,并讨论了HASM方法在后续发展过程中应重点考虑的问题。

2 HASM发展综述

HASM的发展可以分为四个阶段。其中第一

阶段(1986-2001年),基于空间曲率理论认为空间曲面由其曲率决定。坡度和曲率是曲面分析中的重要变量(Evans, 1980),事实上,基于曲面论基本定理,曲面由其坡度和曲率唯一决定(Spivak, 1999)。基于此,岳天祥等(1990)构建了冰斗模型,并随后应用到地球表面变化探测的相关研究中(Yue et al, 2002)。第二阶段(2002-2007年),HASM的研究围绕曲面论基本定理展开,重点解决了曲面模拟的误差问题(Yue, 2011)。地球表面可以表达为(Kerimov, 2009): $z=f(x, y)$,其中 z 是在位置 (x, y) 的曲面属性。对于曲面方程 $z=f(x, y)$,构建了迭代HASM方程,将曲面模拟问题转化为对称正定的大型稀疏线性方程组问题(Yue et al, 2007)。第三阶段(2008-2011年),基于曲面论的HASM方法重点研究该方法的计算效率和内存需求问题。由于需要构建覆盖研究区域每个格网属性值的大型线性方程组,HASM方法求解计算时间消耗较大。为加速求解HASM,先后发展了多重网格HASM算法(HASM-MG)(Yue et al, 2008; Yue, Zhao et al, 2013)、HASM自适应算法(HASM-AM)(Yue, Chen et al, 2010)、HASM平差算法(HASM-AC)(Yue, Wang, 2010),以及HASM预处理共轭梯度算法(赵娜等, 2012)等。其中多重网格算法是基于误差平滑理论和粗网格校正理论,是求解偏微分方程组最快的数值算法;HASM自适应算法的基本思想是在迭代计算过程中对误差超过一定阈值的网格进行标记继续迭代计算,而满足精度要求的格网点则不再参与新的迭代计算过程,以达到加速整体收敛计算的目的。第四阶段(2012年以来),将高斯—柯达西方程组引入HASM理论体系中(Yue, Zhao, Ramsey et al, 2013; Zhao, Yue, 2014),高斯—柯达西方程组作为迭代停止的一个依据,避免了之前人为主观设定迭代次数的缺陷,使HASM在理论上更加完美。同时,在算法方面也对HASM平差算法、HASM预处理共轭梯度算法等进行优化(赵明伟等, 2013; 赵明伟, 岳天祥, 赵娜, 2014),提高了上述HASM算法的解算速度和模拟精度。同时还引入HASM并行算法与基于MPI的并行策略(Zhao et al, 2015),将研究区域按照一定的划分策略分割成子区域进行计算,大大提高了HASM解决大区域、高分辨率问题的能力。

HASM的各个阶段按其发展顺序,模拟精度依次提高,且HASM 4在计算速度上与前三个阶段相比,有了很大的改善(岳天祥等, 2007)。数值试验表

明,HASM方法的模拟精度比在GIS、CAD领域广泛使用的经典插值方法(反距离权重法(IDW)、克里金法(Kriging)、样条法(Spline)等)提高了多个数量级(Yue et al, 2007)。对HASM模型精度大幅度提高的理论分析表明,HASM能解决数值模拟中的峰值削平现象,且模拟精度对采样点之间的距离并不十分敏感(岳天祥等, 2007)。HASM模型的整个计算过程可分为偏微分方程组的离散、采样方程的建立及代数方程组的求解三个阶段(Yue, 2011)。即: HASM基于曲面论基本定理,将曲面所满足的微分方程组进行离散,然后结合采样点信息对离散后的代数系统进行求解。

在应用方面,HASM方法已经成功应用于数字高程模型(DEM)构建及相关卫星DEM数据产品的空缺值填补研究(Yue et al, 2007; Chen et al, 2010, Chen et al, 2012; Yue et al, 2012; Chen, Li et al, 2013; Chen, Yue et al, 2013);同时还应用于土壤属性要素、土壤污染物等的空间分布模拟(Shi et al, 2009, 2011, 2012),气候要素(气温、降水、辐射等)的时空变化模拟与分析(Yue, Zhao, Yang et al, 2013; Yue, Zhao, Ramsey et al, 2013; Zhao N, Yue T X, 2014; Zhao N, Yue T X, Zhao M W et al, 2014; 赵娜等, 2014)。近年来,HASM方法在碳源汇及全球变化领域也得到成功应用,如卫星反演 XCO_2 数据的空缺值填补(Yue et al, 2015)、森林植被碳储量空间分布模拟(Zhao M W et al, 2014)、草地生物量空间分布模拟(赵明伟等, 2014)、基于Lidar点云数据的小流域尺度上的树高模拟(Wang Y F et al, 2015)等。这些研究采取一定的精度验证方案,都表明HASM方法的精度显著优于经典插值方法。同时部分研究(Zhao M W et al, 2014)结合具体的研究对象,还验证了HASM方法的研究结果在空间分布特征上更符合具体研究对象的分布规律。

3 HASM分类、计算过程及发展展望

3.1 HASM科学分类

如前文所述,最初,HASM方法本质属于空间插值方法,即根据给定的离散采样点数据插值计算得到研究区域的空间曲面。但是在后续发展中,HASM方法开始将卫星遥感数据或生态模型的输出结果(称为驱动场)与地面采样点数据(称为优化控制条件)相结合,取二者之长生成一种新的曲面,

显然这已经不属于空间插值的范畴了。为此,根据所研究问题性质的不同,本文将HASM方法分为空间插值方法和空间数据融合方法。

(1) HASM空间插值

HASM空间插值是指通过HASM方法,将空间中离散的测量点转为连续的数据曲面(图1)。其对数据的要求明确为空间中离散的测量点,不包含除测量点以外的其他数据源。需要特别指出的是,在早期HASM研究中为了提高计算速度,将离散采样点使用普通插值方法得到的初始插值曲面也作为输入,这里的初始插值曲面来源于离散采样点,因此仍属于空间插值。

HASM空间插值的应用范围与常规插值方法一致,其中目前已经成熟应用的领域主要包括DEM构建(Yue et al, 2007; Chen et al, 2010; Chen, Li et al, 2013; Chen, Yue et al, 2013)、土壤要素空间插值(Shi et al, 2011)、气候数据插值(赵娜等, 2013; 赵娜等, 2014)、生物量空间插值(赵明伟, 岳天祥, 孙晓芳等, 2014)等,大量研究表明HASM方法在上述领域中的插值精度优于常规插值方法。

在针对具体问题的应用中,基于HASM的空间变量插值方法又分为以下两种思路:①直接对空间变量进行空间插值,得到连续的空间变化曲面,例如DEM构建、土壤要素空间插值等;②构建插值变量与其他变量(如高程、空间位置等)的回归关系并生成插值变量的趋势面,然后计算离散点观测值与趋势面值的差值,对差值进行空间插值,最后将残差曲面与趋势面叠加得到最终变量的插值结果,相关研究表明这种思路对于气候要素的空间插值具有更高的插值精度(Zhao N, Yue T X, 2014)。

(2) HASM空间数据融合

HASM空间数据融合是指通过HASM方法,将同一变量的多种数据集融合在一起,生成一种新的数据集。融合的数据集一般包括两类,即点状数据和面状数据。其中点状数据集为地面观测值,代表了数据集的精度,称作优化控制条件;面状数据来自卫星遥感或者其他模型的输出,代表了数据集的

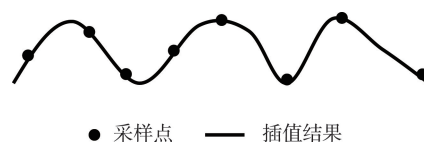


图1 空间插值示意图

Fig.1 Spatial interpolation

范围,称作驱动场。而HASM融合后的结果数据集是面状数据,它将地面优化控制条件的精度优势和驱动场的范围优势结合起来,最终生成一种精度相对较高、又能覆盖整个研究范围的数据曲面(图2)。

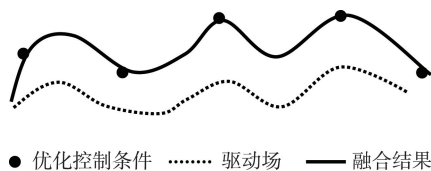


图2 空间数据融合示意图

Fig.2 Spatial data fusion

HASM空间数据融合方法的提出,是为了使卫星遥感观测(反演)的面状数据和地面站点观测的点状数据实现无缝结合,使得数据融合结果既能覆盖整个研究区域,又能将地面观测站点的精度优势融合到结果中。HASM空间数据融合方法在地理学、生态学等领域具有很大的应用潜力,目前已经得到初步应用的有植被碳储量模拟(Zhao M W et al, 2014)和大气XCO₂浓度模拟(Yue et al, 2015)等。

3.2 HASM 计算过程

根据HASM概念模型,HASM空间插值方法和HASM空间数据融合方法的根本区别是前者不需要提供驱动场,但是两者的计算过程基本一致,因此在本小节综合介绍HASM方法的基本原理和计算过程,对于两种方法的区别则在过程中予以说明。

根据曲面论基本定理(Somasundaram, 2005),当曲面的第一基本量 E, F, G ,第二基本量 L, M, N 满足对称性,且 E, F, G 为正定时, E, F, G, L, M, N 满足Gauss-Codazii方程组,全微分方程组(1)在初始条件 $f(x, y)=f(x_0, y_0)(x=x_0, y=y_0)$ 下存在着唯一的解 $z=f(x, y)$ 。

$$\begin{cases} f_{xx} = \Gamma_{11}^1 f_x + \Gamma_{11}^2 f_y + \frac{L}{\sqrt{E+G-1}} \\ f_{yy} = \Gamma_{22}^1 f_x + \Gamma_{22}^2 f_y + \frac{N}{\sqrt{E+G-1}} \\ f_{xy} = \Gamma_{12}^1 f_x + \Gamma_{12}^2 f_y + \frac{M}{\sqrt{E+G-1}} \end{cases} \quad (1)$$

式中:第一基本量和第二基本量,以及克式符号 $\Gamma_{11}^1, \Gamma_{11}^2, \Gamma_{22}^1, \Gamma_{22}^2, \Gamma_{12}^1, \Gamma_{12}^2$ 的计算公式可参见已有研究(Zhao N, Yue T X, Zhao M W et al, 2014)。

考虑高斯方程组(1),本文对该方程组中的 f_x, f_y 采用中心差分离散公式,对 f_{xx}, f_{yy}, f_{xy} 采用高阶差分

离散格式:

$$\begin{cases} f_x = \frac{f_{i+1,j} - f_{i-1,j}}{2h} \\ f_y = \frac{f_{i,j+1} - f_{i,j-1}}{2h} \end{cases} \quad (2)$$

$$\begin{cases} f_{xx} = \frac{-f_{i+2,j} + 16f_{i+1,j} - 30f_{i,j} + 16f_{i-1,j} - f_{i-2,j}}{12h^2} \\ f_{yy} = \frac{-f_{i,j+2} + 16f_{i,j+1} - 30f_{i,j} + 16f_{i,j-1} - f_{i,j-2}}{12h^2} \\ f_{xy} = \frac{f_{i+1,j+1} - f_{i+1,j} - f_{i,j+1} + 2f_{i,j} - f_{i-1,j} - f_{i,j-1} + f_{i-1,j-1}}{2h^2} \end{cases} \quad (3)$$

式中: h 是指计算网格尺寸,将式(2)和式(3)分别带入到式(1),便得到HASM模型的最终求解方程组。在采样点位置,HASM模型要求满足: $f_{i,j} = \overline{f_{i,j}}, (x_i, y_j) \in \varphi$,其中 φ 为采样点构成的集合。上述差分方程组对应的矩阵表达形式为:

$$\begin{cases} \mathbf{A} \mathbf{z}^{n+1} = \mathbf{d}^n \\ \mathbf{B} \mathbf{z}^{n+1} = \mathbf{q}^n \\ \mathbf{C} \mathbf{z}^{n+1} = \mathbf{p}^n \end{cases} \quad (4)$$

式中: $\mathbf{A}, \mathbf{B}, \mathbf{C}$ 分别为方程组(1)左边的系数矩阵,可由式(3)计算; $\mathbf{d}, \mathbf{q}, \mathbf{p}$ 为方程组(1)右边的常数向量, \mathbf{z} 为待求解向量, n 为迭代次数。

基于最小二乘优化理论,HASM最终转化为求解下述最小二乘问题:

$$\begin{cases} \min \left\| \begin{bmatrix} \mathbf{A} \\ \mathbf{B} \\ \mathbf{C} \end{bmatrix} \mathbf{z}^{n+1} - \begin{bmatrix} \mathbf{d} \\ \mathbf{q} \\ \mathbf{p} \end{bmatrix} \right\|_2 \\ \mathbf{S} \mathbf{z}^{n+1} = \mathbf{k} \end{cases} \quad (5)$$

式中: \mathbf{S} 和 \mathbf{k} 分别为采样点系数矩阵和采样点的值,与传统HASM相同。通过引入权重参数 λ ,上述约束最小二乘问题转化为:

$$\min \left\| \begin{bmatrix} \mathbf{A} \\ \mathbf{B} \\ \mathbf{C} \\ \lambda \mathbf{S} \end{bmatrix} \mathbf{z}^{n+1} - \begin{bmatrix} \mathbf{d} \\ \mathbf{q} \\ \mathbf{p} \\ \lambda \mathbf{k} \end{bmatrix} \right\|_2 \quad (6)$$

最优化问题,即式(6)等价于:

$$\mathbf{W} \mathbf{z} = \mathbf{v} \quad (7)$$

$$\mathbf{W} = \mathbf{A}^T \mathbf{A} + \mathbf{B}^T \mathbf{B} + \mathbf{C}^T \mathbf{C} + \lambda^2 \mathbf{S}^T \mathbf{S} \quad (8)$$

$$\mathbf{v} = \mathbf{A}^T \mathbf{d} + \mathbf{B}^T \mathbf{q} + \mathbf{C}^T \mathbf{p} + \lambda^2 \mathbf{S}^T \mathbf{k} \quad (9)$$

式中: \mathbf{W} 为对称正定大型稀疏矩阵。

式(7)为一大型线性方程组表达式,即HASM计算最终转化为大型线性方程组的求解。由于线性方程组阶数较大,直接求解法已经不适用,一般需要采用迭代法进行线性方程组的求解,例如高斯—

赛尔德迭代法,预处理共轭梯度迭代法等(赵娜等, 2012)。大型线性方程组计算出满足精度的解后,将解向量的元素值对应相应的空间位置,即得到研究目标变量的空间分布曲面。

在实际应用中,根据所研究问题的性质确定是采用 HASM 空间插值方法还是 HASM 空间数据融合方法。明确所需方法后,可按照如下步骤进行建模求解:

(1) 根据计算区域面积和计算结果分辨率,构建系数矩阵 A , B , C ; 根据采样点信息,构建系数矩阵 S 和向量 v 。

(2) 构建大型稀疏线性方程组,参数 λ 可取足够大的实数,例如默认可取值 10000。

(3) 求解大型稀疏线性方程组,对求解结果进行精度判定,如果满足精度条件则将结果输出,否则进行外迭代,即更新方程右端向量,重新求解大型稀疏线性方程组。

(4) 求解结果满足精度条件,将结果输出到外部文件中。

对于 HASM 空间插值方法和空间数据融合方法,其区别在于当进行第一次迭代求解时, HASM 空间插值方法的右端向量(式(2))是 0 值,即空间插值对于未知点的计算仅仅是依靠有限的空间采样点。而空间数据融合方法进行计算时,右端项是非 0 值,具体数值由驱动场计算得出,第一基本量和第二基本量的组合将驱动场的趋势信息传递给 HASM 方法。因此,对于空间数据融合, HASM 不仅考虑了采样点,还同时将驱动场计算在内,实现了采样点状数据和驱动面状数据的有效融合。

3.3 HASM 发展展望

(1) 结果空间分辨率设定

HASM 方法计算结果的空间分辨率由优化控制点决定,其中优化控制点所代表的范围决定了计算结果空间分辨率的下限,而具体的分辨率设置则同时需要参考优化控制点的分布密度等因素。这里所讲的优化控制点所代表的范围是针对特殊问题而言,例如在温室气体卫星反演数据产品中, SCIMACHY 发布的 XCO_2 有效数据点代表的空间范围是 $0.5^\circ \times 0.5^\circ$, 因此在对该数据点进行空间插值时,插值结果空间分辨率应不高于 0.5° 。对其他问题而言,优化控制点所代表的范围就是地理空间中的一个点,例如 DEM 构建中的采样点,此时理论上计算结果的分辨率可以尽可能高,具体设置时

根据优化控制点在研究区域中的分布密度决定。

(2) 曲面理论和空间统计理论的结合

HASM 的理论基础是曲面论基本定理,该定理指出,曲面的形状由第一基本量和第二基本量唯一决定。但是,由于地理研究对象在自然空间中的分布并不一定符合标准的数学曲面,同时,由于人工采集过程中不可避免引入的误差,优化控制点可能会带有较大的误差。因此在采用 HASM 方法进行计算分析时必须考虑这种不一致性和误差,此时可以考虑引入空间统计学的相关理论。

此外,以往的 HASM 研究过于重视数学理论的推导,相对忽视研究对象本身的地理学特性,例如绝大部分研究属性在空间中的分布并不是光滑的数学曲面,对于该类问题该如何处理,仍需要考虑。

(3) HASM 区域算法的发展

本文提出的发展高精度的区域 HASM 算法是基于如下几个方面的考虑:首先, HASM 全局算法巨大的内存占用和时间消耗,例如,要计算覆盖中国大陆区域的 1 km 分辨率的某种变量,计算规模大约为 4000×5000 ,则需要求解的线性方程组阶数为 2×10^7 ,这一计算量是非常大的,必然带来较大的时间消耗。其次,对于研究规模较大的问题,利用全局算法进行计算可能并不合理。因为考虑到研究变量的空间异质性,变量在空间中的分布可能是不同区域对应不同曲面形态的情况,此时 HASM 区域算法更加合理。虽然当前基于 MPI 的并行 HASM 方法能够快速计算大区域、高分辨率的问题(Zhao et al, 2015),但其应用仍然受到一定的限制,表现在当采样点稀疏且分布不均时,采用棋盘式数据分割方法效果较差;即便优化区域分割方案,当采样点特别稀疏时,单个区域的计算可能也难以开展。因此,根据研究对象在空间中的分布特征,设计区域化的 HASM 求解方法,是解决 HASM 计算效率的重要途径。

此外, HASM 在计算过程中对于采样点赋一个权重,目前该权重是默认统一的。而实际上,一个采样点的影响范围应该是有限的,并受曲面本身形态的影响,因此,在后续研究中应该构建一个可变权重的采样点设置方案。

4 结论

HASM 方法发展至今,在算法和理论两方面都

取得了长足的发展。但随着该方法在更多领域中的应用,其理论缺陷也开始显现,最为明显的就是关于HASM方法的定义不明确。由于定义的不确定造成了关于该方法应用的一些混乱,也制约了该方法的进一步发展。

本文在总结HASM发展历程的基础上,重点阐述了HASM方法的科学分类。根据研究问题性质的不同,将HASM方法分为HASM空间插值方法和HASM空间数据融合方法。前者是基于给定的离散采样点模拟区域曲面;后者则是融合场数据和离散点数据各自的优势,优化原始场数据,提高其精度的方法。

HASM方法的科学分类解决了HASM是否属于空间插值方法的疑惑,为今后HASM方法的科学应用提供方法指导。两种方法的计算机理不同,其研究和要解决的问题也不同。同时,针对这两类方法,本文还讨论了今后发展中应重点解决的问题,为HASM完整理论体系的发展方向提供有益借鉴。

参考文献(References)

- 陈传法, 郑作亚, 岳天祥. 2010. 基于快速傅里叶变换的ASTER与SRTM有效融合研究[J]. 国土资源遥感, (4): 19-22. [Chen C F, Zheng Z Y, Yue T X. 2010. Efficient fusion of ASTER and SRTM based on fast Fourier transform[J]. Remote Sensing for Land & Resources, (4): 19-22.]
- 凌峰, 王乘, 张秋文. 2006. 基于ASTER数据和空间误差分析的SRTM无效区域填充[J]. 华中科技大学学报: 自然科学版, 34(12): 108-110. [Ling F, Wang C, Zhang Q W. 2006. Filling voids in SRTM data by using the data from ASTER and spatial elevation difference interpolation[J]. Journal of Huazhong University of Science and Technology: Nature Science Edition, 34(12): 108-110.]
- 游松财, 孙朝阳. 2005. 中国区域SRTM 90 m 数字高程数据空值区域的填补方法比较[J]. 地理科学进展, 24(6): 88-92. [You S C, Sun C Y. 2005. Comparison of patching methods of SRTM 90 m DEM voids in China[J]. Progress in Geography, 24(6): 88-92.]
- 岳天祥, 艾南山. 1990. 冰斗形态的数学模型[J]. 冰川冻土, 12(3): 227-234. [Yue T X, Ai N S. 1990. The mathematic model of cirque morphology[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 12(3): 227-234.]
- 岳天祥, 刘纪远. 2001. 第四代地理信息系统研究中的尺度转换数字模型[J]. 中国图象图形学报, 6(9): 907-911. [Yue T X, Liu J Y. 2001. The digital model for transforming information at various scales[J]. Journal of Image and Graphics, 6(9): 907-911.]
- 岳天祥, 刘纪远. 2003. 生态地理建模中的多尺度问题[J]. 第四纪研究, 23(3): 256-261. [Yue T X, Liu J Y. 2003. Issues on multi-scales in ecogeographical modeling[J]. Quaternary Sciences, 23(3): 256-261.]
- 岳天祥, 杜正平, 宋敦江. 2007. 高精度曲面建模: HASM4[J]. 中国图象图形学报, 12(2): 343-348. [Yue T X, Du Z P, Song D J. 2007. High accuracy surface modelling: HASM4[J]. Journal of Image and Graphics, 12(2): 343-348.]
- 赵明伟, 岳天祥, 孙晓芳, 等. 2014. 基于草地综合顺序分类系统(IOCSG)的中国北方草地上生物量高精度模拟[J]. 生态学报, 34(17): 4891-4899. [Zhao M W, Yue T X, Sun X F, et al. 2014. High accuracy simulation of aboveground biomass in northern China based on IOCSG[J]. Acta Ecologica Sinica, 34(17): 4891-4899.]
- 赵明伟, 岳天祥, 赵娜. 2013. 改进的HASM-AD算法及在空间变量模拟的应用分析[J]. 地球信息科学学报, 15(5): 655-661. [Zhao M W, Yue T X, Zhao N. 2013. Application analysis of the improved HASM-AD in the spatial variable simulation[J]. Journal of Geo-Information Science, 15(5): 655-661.]
- 赵明伟, 岳天祥, 赵娜. 2014. 高精度曲面建模优化方案[J]. 中国图象图形学报, 19(2): 290-296. [Zhao M W, Yue T X, Zhao N. 2014. HASM optimization based on the improved difference scheme[J]. Journal of Image and Graphics, 19(2): 290-296.]
- 赵娜, 岳天祥. 2012. 高精度曲面建模的一种快速算法[J]. 地球信息科学学报, 14(3): 281-285. [Zhao N, Yue T X. 2012. Fast methods for high accuracy surface modeling[J]. Journal of Geo-Information Science, 14(3): 281-285.]
- 赵娜, 岳天祥, 王晨亮. 2013. 1951-2010年中国季平均降水高精度曲面建模分析[J]. 地理科学进展, 32(1): 49-58. [Zhao N, Yue T X, Wang C L. 2013. Surface modeling of seasonal mean precipitation in China during 1951-2010[J]. Progress in Geography, 32(1): 49-58.]
- 赵娜, 岳天祥, 赵明伟. 2014. 基于改进的HASM方法的中国日照百分率的模拟研究[J]. 地理研究, 33(7): 1297-1305. [Zhao N, Yue T X, Zhao M W. 2014. Surface modeling of sunshine percentage in China based on a modified version of HASM[J]. Geographical Research, 33(7): 1297-1305.]
- Chen C F, Li Y Y, Yue T X. 2013. Surface modeling of DEMs based on a sequential adjustment method[J]. International Journal of Geographical Information Science, 27(7):

- 1272-1291.
- Chen C F, Yue T X. 2010. A method of DEM construction and related error analysis[J]. *Computer & Geosciences*, 36(6): 717-725.
- Chen C F, Yue T X, Dai H L, et al. 2013. The smoothness of HASM[J]. *International Journal of Geographical Information Science*, 27(8): 1651-1667.
- Chen C F, Yue T X, Li Y Y. 2012. A high speed method of SMTS[J]. *Computer & Geosciences*, 41(2): 64-71.
- Evans I S. 1980. An integrated system of terrain analysis and slope mapping[J]. *Zeitschrift Für Geomorphologie Supplementbände*, 36: 274-295.
- Hong Y, Nix H A, Hutchinson M F, et al. 2005. Spatial interpolation of monthly mean climate data for China[J]. *International Journal of Climatology*, 25(10): 1369-1379.
- Karkee M, Steward B L, Aziz S A. 2008. Improving quality of public domain digital elevation models through data fusion[J]. *Biosystems Engineering*, 101(3): 293-305.
- Kerimov I A. 2009. F-approximation of the earth's surface topography[J]. *Izvestiya Physics of the Solid Earth*, 45(8): 719-729.
- Luedeling E, Siebert S, Buerkert A. 2007. Filling the voids in the SRTM elevation model: A TIN-based delta surface approach[J]. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 62(4): 283-294.
- Okano D, Iwasaki A. 2011. Resolution enhancement of ASTER digital elevation model[C]//*Proceedings of 2011 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS)*. Vancouver, BC: IEEE: 2984-2987.
- Palubinskas G, Reinartz P, Bamler R. 2010. Image acquisition geometry analysis for the fusion of optical and radar remote sensing data[J]. *International Journal of Image and Data Fusion*, 1(3): 271-282.
- Papasaika H, Kokiopoulou E, Baltsavias E, et al. 2011. Fusion of digital elevation models using sparse representations [M]//Stilla U, Rottensteiner F, Mayer H, et al. *Photogrammetric image analysis*. Berlin & Heidelberg, Germany: Springer, 6952: 171-184.
- Reuter H I, Nelson A, Jarvis A. 2007. An evaluation of void filling interpolation methods for SRTM data[J]. *International Journal of Geographical Information Science*, 21(9): 983-1008.
- Schultz H, Riseman E M, Stolle F R, et al. 1999. Error detection and DEM fusion using self-consistency[C]//*The proceedings of the seventh IEEE international conference on computer vision*. Kerkyra, Greece: IEEE: 1174-1181.
- Shi W J, Liu J Y, Du Z P, et al. 2009. Surface modelling of soil pH[J]. *Geoderma*, 150(1-2): 113-119.
- Shi W J, Liu J Y, Du Z P, et al. 2011. Surface modelling of soil properties based on land use information[J]. *Geoderma*, 162(3-4): 347-357.
- Shi W J, Liu J Y, Du Z P, et al. 2012. Development of a surface modeling method for mapping soil properties[J]. *Journal of Geographical Sciences*, 22(4): 752-760.
- Slatton K C, Teng S, Crawford M. 2002. Multiscale fusion of InSAR data for hydrological applications[C]//*Symposium on terrain analysis for water resources applications*. Austin, TX: the University of Texas.
- Somasundaram D. 2005. *Differential geometry: A first course* [M]. Oxford, UK: Alpha Science International Ltd.
- Spivak M. 1999. *A comprehensive introduction to differential geometry*[M]. 3rd ed. Houston, TX: Publish or Perish.
- Toponogov V A, Rovenski V Y. 2006. *Differential geometry of curves and surfaces: A concise guide*[M]. New York: Birkhäuser Boston.
- Wang C L, Zhao N, Yue T X, et al. 2015. Change trend of monthly precipitation in China with an improved surface modeling method[J]. *Environmental Earth Sciences*, 74(8): 6459-6469.
- Wang Y F, Yue T X, Du Z P, et al. 2015. Improving the accuracy of the height-diameter equation using the classified factors method[J]. *Environmental Earth Sciences*, 74(8): 6471-6480.
- Yue T X. 2011. *Surface modeling: High accuracy and high speed methods*[M]. New York: CRC Press.
- Yue T X, Chen C F, Li B L. 2010. An adaptive method of high accuracy surface modeling and its application to simulating elevation surfaces[J]. *Transactions in GIS*, 14(5): 615-630.
- Yue T X, Chen C F, Li B L. 2012. A high-accuracy method for filling SRTM voids and its verification[J]. *International Journal of Remote Sensing*, 33(9): 2815-2830.
- Yue T X, Chen S P, Xu B, et al. 2002. A curve-theorem based approach for change detection and its application to Yellow River Delta[J]. *International Journal of Remote Sensing*, 23(11): 2283-2292.
- Yue T X, Du Z P, Song D J, et al. 2007. A new method of surface modeling and its application to DEM construction [J]. *Geomorphology*, 91(1-2): 161-172.
- Yue T X, Wang S H. 2010. Adjustment computation of HASM: A high-accuracy and high-speed method[J]. *International Journal of Geographical Information Science*, 24

- (11): 1725-1743.
- Yue T X, Zhao M W, Zhang X Y. 2015. A high-accuracy method for filling voids on remotely sensed XCO₂ surfaces and its verification[J]. *Journal of Cleaner Production*, 103: 819-827.
- Yue T X, Zhao N, Yang H, et al. 2013. A multi-grid method of high accuracy surface modeling and its validation[J]. *Transactions in GIS*, 17(6): 943-952.
- Yue T X, Zhao N, Ramsey R D, et al. 2013. Climate change trend in China, with improved accuracy[J]. *Climatic Change*, 120(1-2): 137-151.
- Zhao M W, Yue T X, Zhao N, et al. 2014. Combining LPJ-GUESS and HASM to simulate the spatial distribution of forest vegetation carbon stock in China[J]. *Journal of Geographical Sciences*, 24(2): 249-258.
- Zhao M W, Yue T X, Zhao N, et al. 2015. Parallel algorithm of a modified surface modeling method and its application in digital elevation model construction[J]. *Environmental Earth Sciences*, 74(8): 6551-6561.
- Zhao N, Yue T X. 2014. A modification of HASM for interpolating precipitation in China[J]. *Theoretical and Applied Climatology*, 116(1-2): 273-285.
- Zhao N, Yue T X, Zhao M W. 2013. An improved version of a high accuracy surface modeling method[J]. *GEM-International Journal on Geomathematics*, 4(2): 185-200.
- Zhao N, Yue T X, Zhao M W, et al. 2014. Sensitivity studies of a high accuracy surface modeling method[J]. *Science China: Earth Sciences*, 57(10): 2386-2396.

Classification of high accuracy surface modeling (HASM) methods and their recent developments

ZHAO Mingwei^{1*}, YUE Tianxiang²

(1. Anhui Center for Collaborative Innovation in Geographical Information Integration and Application, Chuzhou University, Chuzhou 239012, Anhui, China; 2. State Key Laboratory of Resources and Environmental Information System, Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, CAS, Beijing 100101, China)

Abstract: High accuracy surface modeling (HASM) is a new generation of surface simulation method. After 20 years of development, its theoretical basis has continuously improved, the algorithm is enriched, and the application field is expanding. However, a scientific classification system of HASM methods has not been established and this has prevented further application of HASM in various fields. To solve this problem, this article first summarizes the development process of HASM, then according to the nature of given research problems, HASM is divided into spatial interpolation and spatial data fusion methods based on the type of input data. The HASM spatial interpolation method generates target surface according to discrete sampling points. The HASM spatial data fusion method is the fusion of multi-source data that integrates the advantages of each data source to obtain a new surface. This classification provides a theoretical guidance for the further application of HASM. The article also introduces the general steps of solving spatial simulation problems using the two HASM methods, and the development prospect of the two methods is discussed.

Key words: high accuracy surface modeling (HASM); accuracy; interpolation; data fusion; review