

文章编号: 1671-8860(2005)02-0110-05

文献标志码: A

多级空间信息网格间的平面坐标变换精度分析

袁修孝¹ 付迎春¹ 张 过¹ 付建红¹

(1 武汉大学遥感信息工程学院, 武汉市珞喻路 129 号, 430079)

摘要: 简要介绍了在多级空间信息网格间进行坐标变换的基本原理, 通过对平面仿射变换与严格坐标变换坐标精度的比较发现, 在适当尺度的网格内, 用平面仿射变换代替严格变换的坐标变换精度高于地图表达精度。试验结果为多级空间信息网格的划分及适应空间坐标变换的空间数据组织方式提供了尺度准则。

关键词: 多级空间信息网格; 坐标变换; 精度

中图法分类号: P226.3; P208

众所周知, 我国的 GIS 空间数据是基于各种不同坐标系的, 既有统一的国家大地测量坐标系(1954 北京坐标系和 1980 西安坐标系), 又有地方坐标系。这种以存储某一坐标系下坐标串的空间信息表达方法以及空间数据随坐标系变化而更新的方案难以实现空间数据的共享^[1]。人们试图利用网格计算技术将因特网上的多种计算机整合在一起, 以实现资源共享与协同工作。这样虽可以解决异构数据库的互操作问题, 但是不同时空基准、不同尺度及多源空间数据仍然难以实现共享和互操作, 致使网格计算依然面对现行 GIS 空间数据表达方式的挑战^[2]。为此, 李德仁等提出了既适合网格计算环境, 又充分考虑到地球空间自然特征和社会属性差异以及经济发展不平衡等特点的空间信息表示方法——多级空间信息网格^[3]。

多级空间信息网格是企图通过设计不同大小、不同层次的网格来实现多尺度、不同参考基准空间数据的统一表达。各级网格的中心点坐标可在不同投影、不同坐标系间自由变换, 网格内部对象的细部坐标相对于网格中心点表示, 其相对变化量在各级网格中保持不变。要实现这一目标, 关键在于寻找一种既可满足精度要求, 又能实现不同参考框架间空间数据快速转换的方法。

一般说来, 两个参考框架间的坐标变换有空间直角坐标间的严格变换和平面坐标间的近似仿射变换, 两者在适用范围、转换精度等方面有所区

别^[4]。严格坐标变换在大范围内的坐标转换精度高, 但计算复杂, 且需要高精度的转换参数; 仿射变换在小范围内的坐标转换精度高, 计算速度快, 是坐标变换和高斯投影换带计算的实用方法^[5]。就多级空间信息网格间的坐标变换而言, 采用严格变换方法往往难以获取高精度的转换参数。如果限制网格的大小, 即为了提高坐标变换精度, 将网格划分得足够细, 仿射变换亦有可能满足现有地图要素表达的精度要求, 就可以用仿射变换代替严格坐标变换进行网格间的实时坐标转换。基于这一想法, 本文试图通过对不同尺度网格间两种坐标变换精度的对比分析, 探讨在多大的网格内可以用仿射变换代替严格变换, 从而为网格的划分提供尺度准则。

1 坐标变换原理

1.1 严格坐标变换^[6]

不同大地坐标系间的严格坐标变换一般以空间直角坐标为桥梁, 通过利用布尔莎公式解算两空间直角坐标系间的 7 个变换参数来实现。图 1 是以国家统一坐标系 1980 西安坐标系向 1954 北京坐标系的坐标变换流程图。

1.2 平面仿射变换^[8]

从图 1 可看出, 严格坐标变换是一个非常复杂的过程。如果在两个平面坐标系中能够找到 3 个以上的同名点, 则可通过简单的仿射变换来实

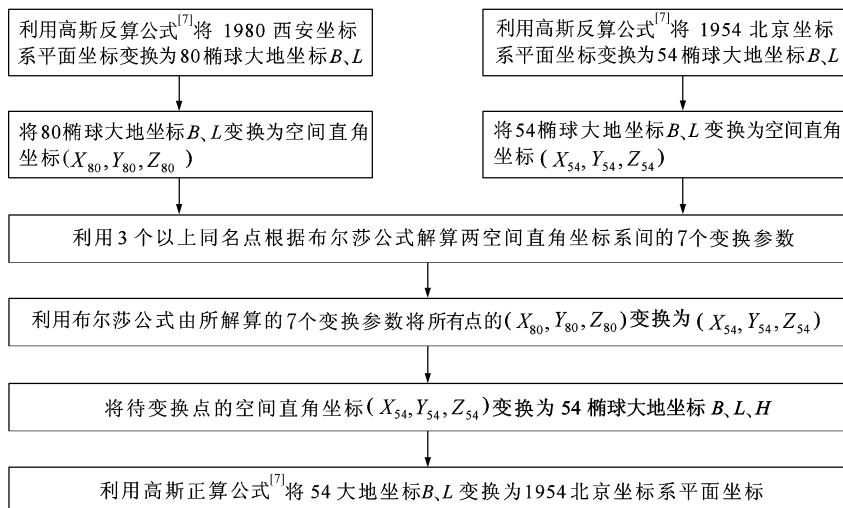


图 1 1980 西安坐标系向 1954 北京坐标系的坐标变换流程图

Fig. 1 Transformation from 1980 Xi'an Geodetic Coordinate System into 1954 Beijing Geodetic Coordinate System

现两坐标系间的平面坐标变换。对于 1980 西安坐标系与 1954 北京坐标系中的坐标,可用式(1)进行平面坐标的近似变换。

$$\begin{bmatrix} X_{54} \\ Y_{54} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_0 \\ b_0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} a_1 & a_2 \\ b_1 & b_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_{80} \\ Y_{80} \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中, a_0 、 a_1 、 a_2 、 b_0 、 b_1 、 b_2 为仿射变换参数。

2 试验设计

2.1 网格划分

本试验中,多级空间信息网格的划分参照我国基本比例尺地形图的分幅进行。由于 1 : 100

万地形图(图幅范围为经差 $6^\circ \times$ 纬差 4°)是我国基本比例尺地形图分幅和编号的基础,为了与地图分幅相适应,以经差 6° 、纬差 4° 的地表区域作为首级基本网格对全球进行划分,以此为基础递归等分为下一级基本网格,每一级网格对应着不同分辨率的空间数据,不同尺度网格的集合便构成多级空间信息网格。表 1 给出了 1~12 级基本网格的大小与相应的地图比例尺、地面分辨率(网格所能表达出的最小地物的大小,即相应地图要素的表示精度 $\sigma = 0.1M$ m, 这里假设地图要素图面精度为 0.1 mm, M 为以 1 000 为单位的地图比例尺分母)。

为了便于多级信息网格间空间数据的相互表

表 1 多级空间信息网格的基本网格划分

Tab. 1 Subdivision Way of Multilevel Spatial Information Grid

基本网格	网格范围		相应比例尺	地面分辨率/m	基本网格	网格范围		相应比例尺	地面分辨率/m
	经差	纬差				经差	纬差		
1	6°	4°	1 : 100 万	100.00	7	$5'37.5''$	$3'45''$	1 : 15 625	1.56
2	3°	2°	1 : 50 万	50.00	8	$2'48.75''$	$1'52.5''$	1 : 7 810	0.78
3	$1^\circ 30'$	1°	1 : 25 万	25.00	9	$1'24.375''$	$56.25''$	1 : 3 900	0.39
4	$45'$	$30'$	1 : 12.5 万	12.50	10	$42.1875''$	$28.125''$	1 : 1 950	0.19
5	$22'30''$	$15'$	1 : 62 500	6.25	11	$21.093 75''$	$14.062 5''$	1 : 975	0.10
6	$11'15''$	$7'30''$	1 : 31 250	3.12	12	$10.546 85''$	$7.031 25''$	1 : 488	0.05

注:“相应比例尺”是指相应地形图的比例尺,按照我国地图标准分幅的一幅地形图幅范围相当于一个网格大小。

示,同时也为了试验确定网格的划分尺度,对每一级基本网格按照图 2 进行细分,可获得 2 分网格(2×2)、4 分网格(4×4)、8 分网格(8×8)等。由表 1 数据可知,将一个相当于 1 : 100 万图幅的网格等分成 2 048 分网格($2 048 \times 2 048$),其大小相当于一幅 1 : 500 的地形图。

2.2 试验数据获取

试验在我国境内北纬 $36^\circ 50' \sim 42^\circ 50'$ 、东经

$90^\circ \sim 96^\circ$ 地区进行。首先按照图 2 的格网细分方法确定各级基本网格的四个角点,并在网格内规则地生成一定数量的检查点;然后以美国地质调查局提供的全球 1 km 分辨率 DEM (Global 30-arc-second digital elevation data (GTOPO30))为基础,采用双线性内插方法得到网格中全部点在 WGS-84 坐标系中的大地坐标和大地高 (B, L, H);最后分别利用上述严格坐标变换模型和国家



图2 细分网格试验设计

Fig. 2 Trial Design of Sub-grids

基本参数将每一个点变换至 WGS-84 空间直角坐标系、1954 北京坐标系和 1980 西安坐标系中，以获得各个点在三个坐标系中的严格坐标。在将大地坐标向 WGS-84 空间直角坐标以及 1954、1980 坐标系平面坐标分别向 54、80 椭球大地坐标的高斯正反解算过程中，经上述严格坐标变换模型计算的 10 000 个点的坐标与利用国家基本参数转换结果相比较，WGS-84 空间直角坐标中三维坐标 X 、 Y 、 Z 的最大差别分别为 0.06 mm、-0.25 mm、-0.5 mm，平均点位中误差为 0.49 mm。为顾及地图上的点位误差，分别产生三组随机误差，并顺序地加到同名点的三套坐标上。误差的引入参照每级基本网格所对应地图的比例尺，加入的随机中误差等于网格的地而分辨率 σ 。试验采用软件控制的伪随机数发生器，一次产生符合试验要求的若干个随机数。为了使该随机数列服从正态分布，先利用乘同余法^[9]产生一组近似符合 $[0,1]$ 分布的伪随机数，再将其标准化产生一组给定精度 σ 的随机误差。统计发现，该组随机数均值为零，方差为 $(1 \pm 0.001)\sigma$ 。

2.3 精度评定

按上述方法产生的一组量测精度为 σ 的地图

数据点中，取出细分网格的四个角点进行平面仿射变换，以求出细分网格内 n 个检查点的平面坐标，并视严格变换坐标为真值进行比较，以获得网格间仿射变换相对于严格坐标变换的每一个变换点的位置误差 Δ_i ：

$$\Delta_i = \sqrt{(X_C - X_T)^2 + (Y_C - Y_T)^2} \quad (2)$$

式中， (X_T, Y_T) 为严格变换坐标值； (X_C, Y_C) 为仿射变换坐标值。

由细分网格中 n 个变换点所统计出的近似变换整体位置误差为：

$$\mu = \sqrt{\frac{\sum \Delta_i^2}{n}} \quad (3)$$

3 坐标变换精度分析

3.1 同级网格间的坐标变换

多级信息网格间空间数据的相互表示需要实现不同坐标系中同级网格（相当于同一比例尺的地形图间）或不同级网格（相当于不同比例尺的地形图间）坐标间的快速变换，试验在三个不同坐标系间实施同级网格或不同级网格的坐标变换，并分析了仿射坐标变换的精度。其中自 1980 西安坐标系向 1954 北京坐标系的坐标变换针对表 1 的 1~11 级基本网格进行。同一级网格的两种坐标系间实施坐标变换后的仿射坐标变换精度见表 2。

若取图上 0.1 mm 为精度测度，则可以接受的基本网格间坐标变换极限点位误差为 $\sigma_{\text{极}} = 0.2M \text{ m}$ (M 为以 1 000 为单位的地图比例尺分母)。从表 2 中可以看出，对于 1 级网格，只有在 16 分网格中的仿射变换中误差小于极限误差值 (200 m)；对于 2 级基本网格，只有在 8 分网格中

表 2 同级网格间的坐标变换精度

Tab. 2 Accuracy of Coordinate Transformation Between the Same Level Grids

网 格	基本网格			2 分网格			4 分网格			8 分网格			16 分网格			
	检查 点数	μ/m	\max/m	N	检查 点数	μ/m	\max/m	N	检查 点数	μ/m	\max/m	N	检查 点数	μ/m	\max/m	N
1	8 000	245.20	516.30	1	4 000	240.65	507.07	1	2 000	232.10	489.02	4	1 000	229.55	465.94	1
2	4 000	118.87	244.10	2	2 000	112.77	243.45	3	1 000	108.02	240.39	4	500	99.46	235.77	5
3	4 000	57.20	121.83	3	2 000	55.66	126.75	2	1 000	53.35	118.62	6	500	49.10	115.36	4
4	4 000	29.88	59.92	1	2 000	28.40	60.14	1	1 000	26.52	64.23	6	500	24.93	61.85	7
5	4 000	15.46	35.48	2	2 000	14.56	34.43	3	1 000	13.28	35.63	2	500	11.90	32.50	7
6	4 000	7.03	14.44	1	2 000	7.10	17.55	7	1 000	6.55	14.66	5	500	6.16	14.14	6
7	2 000	3.94	7.10	8	1 000	3.46	7.71	7	500	2.96	7.94	9				
8	2 000	1.76	3.95	5	1 000	1.67	3.84	4	500	1.51	3.24	7				
9	2 000	0.88	1.94	2	1 000	0.87	1.94	4	500	0.78	1.72	5				
10	1 000	0.42	0.97	3	500	0.37	0.84	4								
11	1 000	0.22	0.47	4	500	0.19	0.45	7								

注： μ 为由式(3)计算的平均点位中误差； \max 为最大点位误差； N 为大于两倍中误差的误差个数。

的近似变换中误差小于极限误差值(100 m);对于 7 级基本网格,只有 4 分网格的近似变换中误差小于极限误差值(3.12 m)。表 2 数据也显示,在基本网格间的坐标变换中有少量点的坐标变换误差超出了极限点位误差,究其原因是由于数据模拟过程中引入了较大的随机误差所致(因为个别随机误差会超过 3σ)。在真实地图数据中,各地物点的坐标精度较为一致,不会出现个别点坐标精度极低的情况。如果排除这一影响,基本网格

间的坐标变换完全可以满足精度要求。同一级网格自 1954 北京坐标系向 WGS-84 坐标系和自 1980 西安坐标系向 WGS-84 坐标系实施坐标变换的结果与表 2 一致,限于篇幅,这里不再列出。这一结果表明,各级基本网格的仿射变换点位误差与网格的经纬度位置无关,并随细分网格的尺度减小而减小,即在越小的细分网格中,仿射变换点位误差越小。综合考虑数据量及计算复杂度,表 3 给出了确定各级基本网格的细分方式。

表 3 基本网格的细分方式

Tab. 3 Subdivision Way of Main Grids

基本网格		细分 方式	细分网格范围			基本网格		细分 方式	细分网格范围		
编号	相应比例尺		经差	纬差	相应比例尺	编号	相应比例尺		经差	纬差	相应比例尺
1	1 : 100 万	16×16	22.5'	15'	1 : 62 500	7	1 : 15 620	4×4	84.375"	56.25"	1 : 3 900
2	1 : 50 万	8×8	22.5'	15'	1 : 62 500	8	1 : 7 810	4×4	42.187 5"	28.125"	1 : 1 950
3	1 : 25 万	8×8	11.25'	7.5'	1 : 31 250	9	1 : 3 900	4×4	21.093 75"	14.062 5"	1 : 975
4	1 : 12.5 万	8×8	5.625'	3.75'	1 : 15 620	10	1 : 1 950	2×2	21.093 75"	14.062 5"	1 : 975
5	1 : 62 500	8×8	2.812 5'	1.875'	1 : 7 810	11	1 : 976	2×2	10.546 88"	7.031 25"	1 : 488
6	1 : 31 250	8×8	84.375"	56.25"	1 : 3 900						

表 3 中,细分网格的经差和纬差是指可满足精度要求的可向基本网格进行快速变换的最大网格尺寸,相应比例尺是指网格大小相当于对应比例尺的一幅标准地形图。如在 1 级网格中,可用仿射坐标变换取代严格坐标变换的最大区域只相当于 1 : 62 500 比例尺的一幅标准地形图。

3.2 不同级网格间的坐标变换

试验选取表 1 中 1~10 级基本网格,分析自 1980 西安坐标系中的下级网格向 1954 北京坐标系的上级网格进行不同级网格间坐标转换的精度。仿射变换的点位精度见表 4。

比较表 4 中的第 3 列和第 5 列数据可以发

表 4 不同级网格间的坐标变换精度

Tab. 4 Accuracy of Coordinate Transformation Between Different Level Grids

上级网格	下级网格	极限误差/m	坐标转换误差			图上精度/mm	
			检查点数	μ/m	max/m		
1	2	200.00	2 000	169.70	406.11	4	0.17
2	3	100.00	2 000	82.22	189.75	5	0.16
3	4	50.00	2 000	43.68	107.82	4	0.18
4	5	25.00	2 000	22.42	50.40	2	0.18
5	6	12.50	2 000	10.76	26.00	5	0.17
6	7	6.25	2 000	5.14	12.68	5	0.16
7	8	3.12	2 000	2.56	6.32	6	0.16
8	9	1.56	2 000	1.45	2.72	0	0.19
9	10	0.78	2 000	0.31	0.71	5	0.08

注:“图上精度”为将 μ 换算到相应比例尺的地形图上表示。

现,从下级网格向上级网格进行坐标转换时,仿射变换精度均高于可接受的网格间坐标变换极限点位精度。当第 10 级网格(相当一幅 1 : 2 000 比例尺地形图)向第 9 级网格(相当一幅 1 : 4 000 比例尺地形图)转换时,仿射变换精度已高于地图要素的表达精度 0.1 mm。此外,笔者在 1954 北京坐标系与 WGS-84 坐标系、1980 西安坐标系与 WGS-84 坐标系间进行了同样试验,计算结果对基本网格的细分方式是一致的,细分网格地物在

不同坐标系间自下级网格向上级网格转换(即高分辨率网格空间数据向低分辨率网格空间数据快速转换)亦满足精度要求。

本文通过计算两个坐标系间同级和不同级网格地图要素的转换精度,探讨了满足精度要求的网格划分方式。多级空间信息网格可划分为基本网格和细分网格,对基本网格的细分可实现不同坐标系间同级网格空间数据的快速表达,不同级网格也可实现相互转换,且当网格划分得足够细

时,从下级网格向上级网格(即从高分辨率网格向低分辨率网格)的转换精度高于地图要素的表达精度。

广域范围的 GIS 表达实质是地理信息的参考基准问题,多级空间信息网格同时也是以地方坐标系为参考的空间数据向全球地心坐标框架转换的桥梁。适应时空坐标变换的空间数据表达方法是一种新的表达方法,它本身所带来的空间分析与处理问题、与现行 GIS 空间数据之间的转换问题、细分网格内细部地物点的快速转换问题、网格计算环境下实现信息共享的问题,都有待进一步研究。

参 考 文 献

- 1 魏子卿. 我国大地坐标系的换代问题. 武汉大学学报·信息科学版, 2003, 28(2): 138~143
- 2 骆剑承, 周成虎, 蔡少华. 基于中间件技术的网格 GIS 体系结构. 地球信息科学, 2002, 9(3): 17~24
- 3 李德仁, 邵振峰, 朱欣焰. 论空间信息多级格网及其典

型应用. 武汉大学学报·信息科学版, 2004, 29(11): 945~950

- 4 刘根友, 朱耀仲, 朱才连. 一种 GPS 网与经典地面网坐标转换的新方法. 工程勘察, 2003, 1(1): 42~45
- 5 王晏民. 多源 GIS 高斯投影快速换带算法研究. 测绘工程, 2002, 11(1): 8~13
- 6 徐绍铨, 吴祖仰. 大地测量学. 武汉: 武汉测绘科技大学出版社, 1996
- 7 杨启和. 地图投影变换原理与方法. 北京: 解放军出版社, 1989
- 8 胡毓钜. 地图投影. 北京: 测绘出版社, 1992
- 9 盛 骞. 概率论与数理统计. 北京: 高等教育出版社, 1999

第一作者简介:袁修孝,博士,教授,博士生导师。主要从事航空航天遥感高精度对地目标定位理论与方法、高分辨率卫星遥感影像几何处理等研究与教学工作。代表成果:GPS 辅助空中三角测量等。已出版专著 2 部,发表论文近 50 篇,被 SCI/EI 收录 2/6 篇。

E-mail: yxxqhyw@public.wh.hb.cn

Accuracy Analysis of Planmetric Coordinate Transformation Between Spatial Information Multi-grids

YUAN Xiuxiao¹ FU Yingchun¹ ZHANG Guo¹ FU Jianhong¹

(1 School of Remote Sensing and Information Engineering, Wuhan University, 129 Luoyu Road, Wuhan 430079, China)

Abstract: This paper introduces briefly the principle of coordinate transformation between the spatial information multi-grids. By comparing the coordinate accuracy of the affine transformation and rigorous coordinate transformation, it is found that the coordinate accuracy of affine transformation instead of rigorous coordinate transformation is higher than map presentation accuracy in the grid of proper scale. The experimental results provide the scale criterion for both the division of spatial information multi-grid and the manner of spatial data organization which is adapt to spatial coordinate transformation.

Key words: spatial information multi-grid; coordinate transformation; accuracy

About the first author: YUAN Xiuxiao, Ph. D., professor, Ph.D supervisor. He is concentrated on the research and education in remote sensing (RS), global positioning system (GPS) and their integration. He has made unique and original contribution to the areas of theories and methods for high precision photogrammetric positioning, GPS-supported aerotriangulation, analytical processing of SPOT imagery and digital image compression, etc. He published 2 monographs and more than 40 papers of which 8 are indexed by SCI, EI and ZfV.

E-mail: yxxqhyw@public.wh.hb.cn

(责任编辑: 晓晨)