遥感图像与地理坐标匹配的快速算法

段辉明 卫 东 葛成辉 孙卫东

(清华大学电子工程系遥感研究室,北京 100084)

摘 要 针对在遥感图像处理中,在进行图像像素坐标与地理坐标相互转换时,转换速度和转换精度不能同时满足的矛盾,引入索引矩阵的概念,提出并实现了一种新的快速转换算法。该算法能快速、精确地进行地理坐标与图像像素坐标的相互转换。通过 MODIS 图像验证,可在接收图像的同时,实时地将经、纬度网格,省界(或州界)等地理信息叠加到卫星图像上。这对于要求实时处理的应用任务,如火灾监测的快速定位、军事侦察等具有极其重要的价值。

关键词 图像坐标 地理坐标 地理信息系统 匹配 MODIS 图像 转换矩阵

中图法分类号: TP751.1 **文献标识码**: A **文章编号**: 1006-8961(2004)01-0087-06

Fast Coordinating Transformation Between Image of Remote and Geodetic Coordinates

DUAN Hui-ming, WEI Dong, GE Cheng-hui, SUN Wei-dong

(*Remote Sensing Lab*, *Electronics Engineering Department*, *Tsinghua University*, *Beijing* 100084)

Abstract Coordinating transformation between image of GIS data and geodetic coordinates is problem frequently met in processing of remote sensing images, which involves a contradiction between processing speed and conversion accuracy. To solve this contradiction, a new algorithm which introduces a new conception of Index Array is developed base on analysis existing methods of registration, which can be used to retrieve pixels of corresponding coordinates directly and avoid heavy computation need by traditional searching. This algorithm is characterized of quick accurate transformation between the two coordinates, and allows real-time superposing geographical info, such as geographical coordinates and boundaries, on real time received remote sensing images which proves to be correct by experiments in MODIS real time data receiving.

Keyword Screen coordinates, Geographical coordinates, MODIS, Conversion array

1 引 言

随着科技的不断进步,人们发射了各种各样的遥感卫星(如 NOAA、MODIS 等)[1],使人们能够从太空中来观察人类居住的地球。当得到遥感图像后,其中一件重要的工作就是将遥感图像与地理坐标进行精确匹配,使遥感图像坐标与地理信息相联系,以利于提取有用信息。由于遥感图像与地图的坐标系不同,因此必须将 2 个坐标系统进行匹配,以便将它们统一到一个坐标系中。匹配可从如下两个方面进行:

(1) 将遥感图像与地理坐标匹配。这种方法需要对遥感图像进行重采样,且所需要的处理时间较长,因此,该方法主要用于接收遥感图像的后处理过程中。当前流行的几个大型遥感数据处理软件,如 Envi、AroInfo 等都是采用的这种方法。

(2) 将地图(经纬网格、省界、河流等)匹配到遥感图像上,用于实时观察遥感数据,但是目前尚无此类软件,本文实现算法属于第 2 种。

在这里,"匹配"也包括以下 2 个方面的意义:一是求出图像上每个像素点的地理坐标(经纬度),即在知道图像像素坐标的情况下,求出地理坐标;二是将地图(经纬网格、省界、河流等)叠加到遥感图像上,即在知道地理坐标情况下,求出图像像素坐标。对于遥感图像与地理坐标的精确匹配,虽已有一些方法,但是这些方法有一个共同的问题,那就是不能同时满足对匹配精度和快速处理的要求,即,如要求匹配精度高,则处理速度慢;若要求处理速度快,则

收稿日期:2002-08-16;改回日期:2003-07-18

匹配精度差。

随着遥感图像的应用越来越广，一些对时间要求快的应用，需要一种快速、精确的匹配算法来将遥感图像与地理信息联系起来，以便及时获得更多的有用信息，如森林、草原火灾的探测，由于当从遥感图像上发现火灾情况，需要的是立即得到火点的具体位置，即使不是十分精确，而目前流行的一些大型软件（如 Envi），对于 MODIS（Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer）中分辨率成像光谱仪数据，一般都需要几个小时后，才能计算出精确定位的火点位置，因而不能满足上述应用的要求。

本文根据遥感图像匹配原理，通过引入索引矩阵的概念，提出了一种能同时满足匹配精度和处理速度的匹配方法，并以 MODIS 图像数据为例，使用 Visualc C 6.0 为开发工具，在 PC 机上实现了这一方法。经验证，用该算法可以在 MODIS 数据接收的同时，实时显示 MODIS 图像，并可实时叠加地理信息（经纬网格、省界、河流等），从而不仅满足了对遥感图像分析、处理的时效要求，而且为遥感图像的应用开辟了新领域。

2 原 理

2.1 最简单的匹配方法

对于一幅无经纬度网格的遥感图像，要将其与地理坐标（经纬度）相匹配，最简单的做法是：首先在图像上找到 2 个或更多的控制点（同时知道图像坐标和地理坐标的点），然后按线性映射关系（每度相当于多少公里），计算出图像上所有点的地理位置（经纬度）[2]。

如图 1 所示：如果知道 A、B 两点的图像坐标 (X_A, Y_A)、(X_B, Y_B)，及地理坐标 (U_A, V_A)、(U_B, V_B)，则 C 点的地理坐标就可由其图像坐标及 A、B 点地理坐标按线性公式计算出，反之，C 点的图像坐标也可由其地理坐标及 A、B 点图像坐标按线性公式计算出。其计算公式如下：

（1）由图像坐标计算地理坐标的公式如下

$$U_C = U_A + \frac{X_C - X_A}{X_B - X_A} \times (U_B - U_A) \quad (1)$$

$$V_C = V_A + \frac{Y_C - Y_A}{Y_B - Y_A} \times (V_B - V_A) \quad (2)$$

（2）由地理坐标计算图像坐标的公式如下

$$X_C = X_A + \frac{U_C - U_A}{U_B - U_A} \times (X_B - X_A) \quad (3)$$

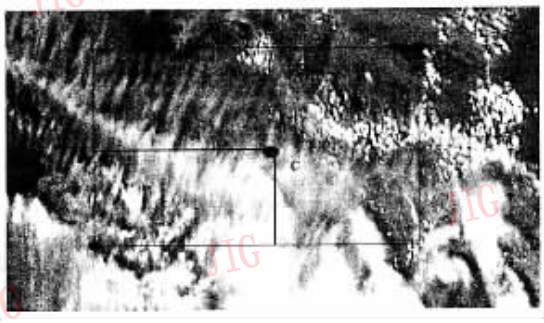

图 1 简单转换算法原理图

$$Y_C = Y_A + \frac{V_C - V_A}{V_B - V_A} \times (Y_B - Y_A) \quad (4)$$

其中，X_k 表示图像上 k 点横坐标，Y_k 表示图像上 k 点纵坐标，U_k 表示图像上 k 点经度，V_k 表示图像上 k 点纬度，$k = A, B, C$。

2.2 简单匹配方法的缺点

虽然上述方法关系简单，运算速度快，但是，有如下 2 个方面的原因限制了它的使用范围：

（1）根据地球坐标投影原理知道，地理坐标与图像坐标并不满足线性关系[3]，在不同的纬度，1° 经度所对应的地面距离不同（图 2），例如在赤道上，1°经度等于 60 nmile，约 111 km，而随着纬度的增加，每经度所对应地面距离相应减少（如图 2 所示），因此只有在纬度跨越范围较小的情况下，才近似满足线性条件。

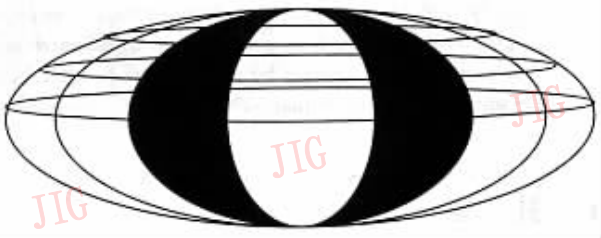

图 2 地球经纬度示意图

（2）对于大部分遥感图像，能很快获得的图像是“正视图”，即图像中，星下点 1 个像素所对应的地面面积与图像边缘 1 个像素所对应的地面面积不同，如在 MODIS 图像中，星下点 1 个像素对应的地面面积约 1 km^2。而在图像边缘，1 像素对应的地面面积约为 2×4 km^2。可见，这也不满足线性条件，只有在小范围内才近似满足。

2.3 改进

上述讨论，只是知道了简单的匹配方法所存在的问题，而改进这种方法，使之能用于遥感图像匹配则是本文要解决的问题。

既然简单匹配方法仅适用于小范围遥感图像与

地理坐标的匹配,那么对于一幅纬度跨度范围大的遥感图像,要将其与地理坐标进行精确匹配,其最直接的方法是:首先将图像分割成很多小面积的子图像,然后在每幅子图像中找到 2 个控制点进行简单匹配,换一种说法就是利用增加控制点数量的方法来实现整幅图像的精确匹配。具体做法是:对于任意给定的点,首先求出与其距离最近的 2 个控制点,再用这 2 个控制点进行简单匹配计算。这样,控制点越多,匹配精度就越高。

但是,要使用这种方法来实现快速、精确匹配,还必须首先解决如下 2 个问题:一是怎样快速获取大量的控制点,且控制点要均匀分布在遥感图像上。二是在诸多控制点中,如何快速找出 2 个最佳控制点(即距给定点距离最近的控制点)。

3　索引矩阵实现的原理与方法

人造卫星的运动轨迹可以由星历表计算出来,而每颗卫星的星历表可以从网上获得,并能不断更新。由于 MODIS 向下传输的是实时数据,且数据流中包含有时间信息,因此可以使用时间信息,根据星历表来计算出卫星在某一时刻的星下点,再根据卫星的轨道参数、地球模型、扫描镜夹角、卫星姿态等,计算出此时刻卫星遥感图像中对应点的地理坐标。通过使用这种方式,就可以计算出遥感图像中每个像素点的地理坐标(经纬度)。这样就得到了所需要的控制点。从理论上讲,控制点越多,匹配越精确,虽然匹配最精确的做法是计算出图像上所有像素的地理坐标,并将其作为控制点,但是在具体实施中,会遇到一些困难,如一幅接收时间为 15 min 的 MODIS 图像,约有 6 000 ×1 354个像素,如果要在程序中计算出如此多的控制点,就目前的计算机速度而言,则时间很长。另外,由于小范围的遥感图像与地理坐标匹配时,基本满足线性条件,不需要把图像上的每个点作为控制点,也能满足精度要求,因此,在具体匹配时,需要根据实际情况,均匀选择一些点作为控制点。

3.1　实现原理及方法

在实现方法中,在横轴和纵轴方向,每隔 10 个像素取一个控制点。这样,就得到一个控制点矩阵(即转换矩阵),可称它为正向转换(已知图像坐标 x、y,求出其地理坐标经度、纬度)矩阵。该矩阵的元素值表示地理坐标,而元素在该矩阵中的位置则与图像中相对应像素的坐标有固定关系,其关系为

$$x=i\times 10,\quad y=j\times 10,\quad \begin{bmatrix} a_{1,1} & \cdots & a_{1,n} \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ \cdots & a_{i,j} & \cdots \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ a_{m,1} & \cdots & a_{m,n} \end{bmatrix}$$

其中,i 表示矩阵元素的位置是第 i 行;j 表示矩阵元素的位置是第 j 列;x,y 表示图像像素坐标位置。

从原理上讲,有了上述正向转换矩阵,对于遥感图像上任一个像素点,都可以将其转换为地理坐标,也可以将任意一个地理坐标点转换到显示图像的图像坐标系中,方法如下:

(1) 正向转换　即由图像坐标转换成地理坐标。对于任意一个已知图像坐标的像素点,若要将其图像坐标转换成地理坐标,则首先根据其图像坐标,使用上述对应关系,求出正向转换矩阵中与该像素距离最近的 2 个元素的行、列数(i,j),再根据(i,j)来得到对应的地理坐标。这样,仅需要做几次乘/除法,就可求出 2 个合适的控制点,再用线性公式,就可求得该像素点的地理坐标。

(2) 反向转换　即由地理坐标转换成图像坐标。对于任意一个已知地理坐标的地面点,若要将其地理坐标转换成图像坐标,则同样要根据其地理坐标,从正向转换矩阵中,求出距离该地面点最近的 2 个控制点。在以前的方法中,一般都是通过遍历正向转换矩阵的每个元素来求出该地面点与转换矩阵中每个元素的距离,再取出与该地面点距离最小的 2 个点作为计算该地面点的控制点。

将正向转换与反向转换过程进行比较,发现它们的不同点在于求出 2 个最佳控制点的方法不同:正向转换是利用图像坐标与转换矩阵元素位置的对应关系来得到 2 个最佳控制点,其与正向转换矩阵的大小无关;反向转换则是用遍历正向转换矩阵的每个元素的方法来求出 2 个最佳控制点,且矩阵越大(元素越多),求出 2 个最佳控制点所消耗的时间越多。正是由于这个原因,在遥感图像匹配时,造成了这样一个现象,即在知道图像像素坐标(x,y)的情况下,就能很快计算出精确的地理坐标;而在知道某点地理坐标的情况下,计算图像坐标时,其计算精度和计算速度则形成了一对矛盾。例如在 MODIS 数据中,一个轨道数据的接收时间约 10～15min,其控制点矩阵的元素约有 135×600 个。一般做一次正向转换,求出 2 个最佳控制点,只需要做 2 次乘法(或除法);而在反向转换中,则首先要求出转换点与转换矩阵中元素的距

离，由距离公式 $d=\sqrt{x^2+y^2}$ 知道，其需要 2 次乘法，一次加法，一次开平方，才能求出该点与转换矩阵中某个元素的距离。也就是说，反向转换必须先做 135×600 次这种运算，然后，再从求得的 135×600 个距离中，求出最小的 2 个，这又需要做 135×600 次比较，因此，做一次反向转换，至少要比做一次正向转换多用 $135\times600\times4$ 倍的时间。

通过分析形成这种现象的原因发现，由于正向转换矩阵中，暗中包含了一种索引关系，即该矩阵中元素序号的顺序与图像像素坐标的大小顺序相同或相反，且该矩阵中 2 个元素之间的距离，与图像坐标系中 2 个点的距离成正比，如在实现的算法中，该矩阵中 2 个元素位置坐标的行差为 5，列差为 4，则对应图像上这 2 个点的横坐标相差 5×10 个像素，纵坐标相差 4×10 个像素。为说明这个概念，假设正向转换矩阵是由将图像中每个像素都作为控制点而产生的，那么在这种情况下，图像像素坐标和该矩阵元素位置坐标的步进一样，都等于 1，因此只要将两者零点重合，那么图像像素坐标就等于该矩阵元素位置坐标。这样在知道图像像素坐标 (x,y) 的情况下，直接用图像像素坐标 (x,y) 作为该矩阵元素的位置坐标，就可求出对应的地理坐标（如图 3 所示）。

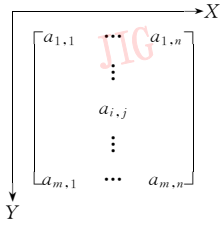

图 3 图像坐标与地理坐标对应关系

其对应关系为，$F(X_k,Y_k)\Leftrightarrow f(U_k,V_k)$ 。

根据上面的分析，如果存在这样一个矩阵，即矩阵元素的位置坐标与地理坐标有一定的对应关系，也就是矩阵元素值即表示图像的像素坐标，那么，在知道某点地理坐标的情况下，计算图像像素坐标，就不必用遍历矩阵的方法来求出 2 个最佳控制点，而只需根据这种对应关系，就能按正向转换的方法求出 2 个最佳控制点。这样，计算速度就与该矩阵的大小无关，从而解决了转换精度与处理速度的矛盾。这样的矩阵称为反向转换矩阵，即产生如下一种新的对应关系

$$F(U_k,V_k)\Leftrightarrow f(X_k,Y_k)$$

如何得到这个反向转换的索引矩阵？可利用正向转换矩阵来产生反向转换矩阵：首先确定一个位置坐标为 $(0,0)$ 的元素，并将其与一个地理坐标关联，再计算出其图像坐标，并将坐标值存入索引矩阵元素中；然后，每间隔 1°，计算一个图像坐标值存入索引矩阵对应元素中，即 1 个转换索引矩阵元素的位置坐标差值，对应地理坐标中 1°（为了提高精度，也可以是其他更小值，如 0.5°）。

至此，就得到了 2 个转换索引矩阵（或称为查找表），$F(X_k,Y_k)\Leftrightarrow f(U_k,V_k)$ 和 $F(U_kV_k)\Leftrightarrow f(X_k,Y_k)$。其中一个用于正向转换（已知图像坐标，求地理坐标），另一个用于反向转换（已知地理坐标，求图像坐标）。

使用这 2 个索引矩阵进行坐标转换，虽然转换速度可以极大提高，但是，如果仅做以上的处理，反向转换出的结果误差较大，且有明显的几何畸变，其原因如图 4 所示，由图 4 可见，当经纬度网格叠加到卫星图像上时，其网格呈菱形状。在计算中，如将其

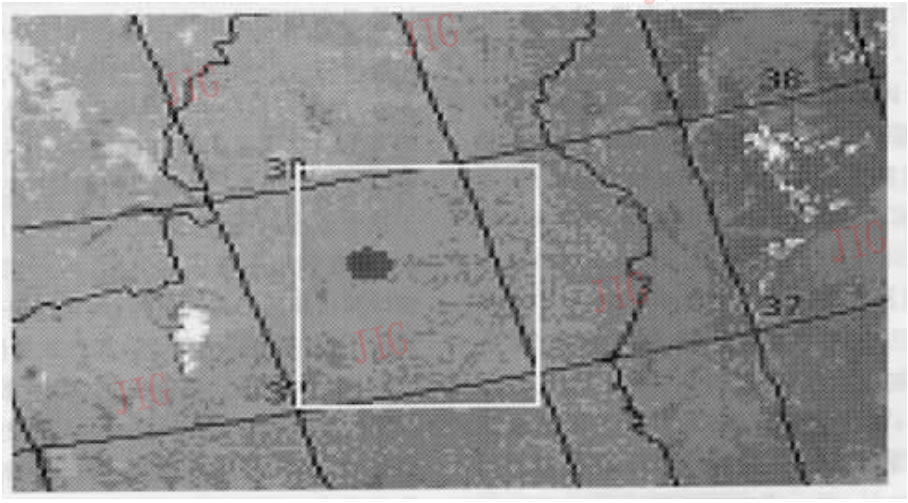

图 4 反向转换后，MODIS 图像与地理坐标匹配图

当成矩形计算（图 4 中白线矩形），就会产生较大的误差（如图 4 所示），可是如果完全按菱形修正，则不仅计算复杂，而且耗费时间，为此在本文的算法中，则是将菱形近似成旋转了一个角度的矩形，但仔细观察，会发现水平方向和垂直方向的旋转角度不同。为了进一步提高精度，可以通过分别计算出水平方向和垂直方向的夹角来进行修正[4]，其最后结果图 5 所示。

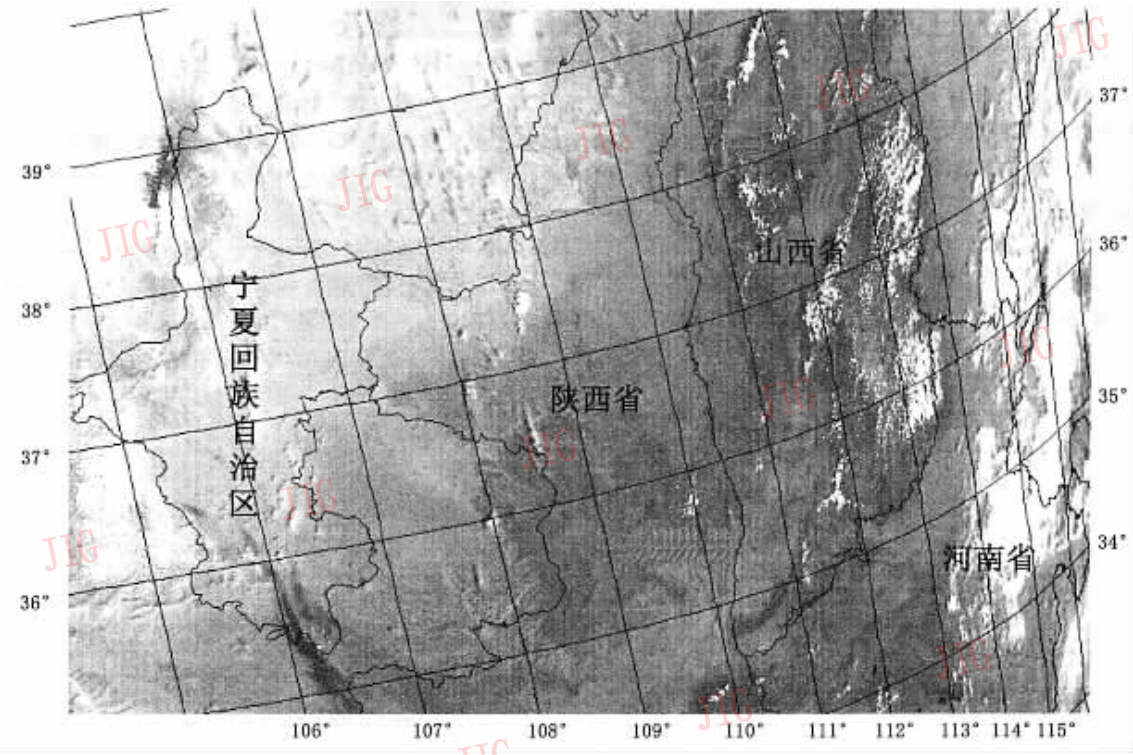

图 5　MODIS 图像与地理坐标匹配图

3.2　误差分析

经 MODIS 图像匹配验证，使用本文算法，其匹配误差平均在 3 个像素左右。该误差产生主要有如下 2 个来源：

（1）产生正向转换矩阵时，计算出来的控制点地理坐标与实际地理坐标有一些误差，其最大误差为 5 个像素点，一般在 0～5 个像素之间随机产生。这是算法误差产生的主要来源，今后如要改进此算法，应从这里着手。

（2）算法假定图像中每个像素对应的地面面积相等，而实际情况并非如此，因为图像中每个像素对应的地面面积随扫描角变化而变化，如在 MODIS 图像中，星下点 1 个像素对应地面面积约 1 km^2；而在图像边缘，1 个像素对应地面面积约 2×4 km^2。但是这个匹配误差，随控制点的增加而减少。

产生匹配误差还有一些其他因素，如地面高程的影响、星历表产生时间与数据接收时间的间隔等，但是由于这些因素对匹配结果的影响不是太大，因此算法中没有考虑。

4　结论与说明

本文通过引入索引矩阵的概念，实现了一种能同时满足匹配精度和处理速度的匹配算法。此算法从原理上属于查表法，与以前算法不同之处在于其动态产生了 2 个查找表，一个用于正向查找，一个用于反向查找，而以前的方法则不论正向查找或是方向查找，都使用同一张查找表。本文算法的特点是：在保证基本精度的情况下，坐标匹配速度快，且运算速度与图像大小无关，尤其适用数据量大的遥感图像。此特点对于火点探测、军事侦察等应用有及其重要的价值。该算法虽然本文只是对 MODIS 图像处理，但是可以推广到其他中、低分辨率卫星图像，因为此算法唯一与 MODIS 数据有直接关系的就是星历表，只要将星历表换为其他卫星的星历表，则算法仍然成立。

参 考 文 献

1 葛成辉,刘闯. 美国对地观测系统(EOS)中分辨率成象光谱仪(MODIS)遥感数据的特点与应用[J]. 遥感信息,2000,(3):45～48.

2 葛成辉,朱正中. 气象卫星遥感原理[M]. 北京:清华大学电子工程系,1992.

3 胡毓钜. 地图投影[M]. 北京:测绘出版社,1986.

4 章孝灿. 遥感数字图象处理[M]. 浙江:浙江大学出版社,1997.

段辉明 1964 年生,1985 年获解放军电子工程学院学士学位,2000 年考入清华大学电子工程系攻读硕士学位。研究方向为遥感卫星数据接收和处理。

卫 东 1967 年生,1989 年获北京航空航天大学学士学位,2000 年考入清华大学电子工程系攻读硕士学位。研究方向为遥感数据高精度定位及轨道计算。

葛成辉 1933 年生,清华大学电子工程系遥感研究室教授。研究方向为卫星图像处理理论、卫星图像接收与处理系统等方面的研究。

孙卫东 1960 年生,清华大学电子工程系遥感研究室教授。研究方向为卫星遥感图像处理、数字图像处理等。