引文格式：林超. 航天正射影像路桥扭曲变形自动检测方法[J]. 地理空间信息, 2024, 22(8): 12-14. doi:10. 3969/j.issn. 1672-4623.2024.08.003

航天正射影像路桥扭曲变形自动检测方法

林　超[1]
（1. 广东省国土资源技术中心，广东 广州 510075）

摘　要：针对高分辨率卫星正射影像制作中普遍存在的路桥扭曲变形问题，提出了一种影像入射参数辅助的路桥变形自动检测方法。该方法首先利用道路矢量确定道路方向并等距获取采样点，然后利用影像入射参数和参考数字高程模型（DEM）计算各采样点间的点位一致性偏移比率，比率越大，该点位附近路桥变形机率越大，由此确定路桥变形区域。实验结果表明，该方法能够快速、准确定位疑似变形区域，自动化程度高，且其效率相较人工核查可提升10倍以上。

关键词：扭曲变形；道路偏移；光线参数
中图分类号：P237　　**文献标志码：**B　　**文章编号：**1672-4623（2024）08-0012-03

Automatic Detection Method of Distortion and Deformation Points of Road and Bridge in Aerospace Orthophoto

LIN Chao[1]
(1. Land Resource and Information Center of Guangdong Province, Guangzhou 510075, China)

Abstract: Aiming at the problem of road and bridge distortion commonly existed in the production of high resolution satellite orthophoto image, we proposed an automatic detection method of road and bridge distortion assisted by image incidence parameters. Firstly, we used the road vector to determine the direction of road, and obtained the sampling points equidistant. Then, we used the image incidence parameters and the reference digital elevation model (DEM) to calculate the point consistency offset ratio between the sampling points. The larger the ratio, the greater the probability of road bridge deformation near the point, and thus the road bridge deformation area is determined. The experimental results show that the proposed method can quickly and accurately locate the suspected deformation area with high degree of automation, and its efficiency is 10 times higher than that of manual verification.

Key words: distortion, road offset, light parameter

影像正射纠正是指利用同地理位置的数字高程模型（DEM），对影像进行投影差改正和灰度重采样，生成正射影像（DOM）的过程。由于DEM保存的高程为地形高程，而不是地表覆盖物高程(如植被、桥梁等)，影像内容反映的实际高程与DEM数据间的高程差就会导致纠正后的DOM存在地物扭曲、变形、拉花（下面统称为变形）等现象，极大影响DOM的质量[1-2]。为了快速定位疑似变形区域，解决问题[3-5]，本文提出了一种影像入射参数辅助的路桥变形自动检测方法，该方法旨在通过自动化计算道路采样点的偏离程度来确定疑似变形区域，从而达到快速高效生产正射影像的目的。

1　道路变形基本原理

在正射纠正过程中，当出现桥梁或悬空的道路时（如山区高速公路），其实际高程与同区域的DEM就会存在高程差异。此时，当利用DEM数据进行影像正射纠正时，就不可避免地造成路桥的扭曲变形。道路变形的简易示意图及其成因如图1所示。

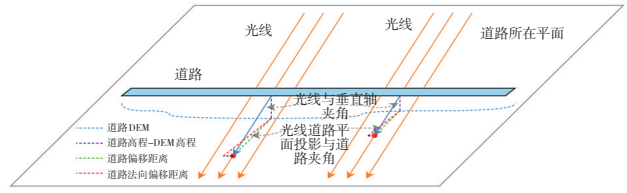


图1　道路变形检测示意图

2　算法介绍

图1表明，要确定影像中是否存在变形区域，即确定在同一平面位置(x,y)处，影像成像光线的实际投影位置P与经由DEM计算得出的投影位置Q是否存在位置偏移。

收稿日期：2022-10-28。
项目来源：广东省“十四五”基础测绘专项基金资助项目（20211610）。
作者简介：林超（1985—），硕士研究生，高级工程师，主要研究方向为地理信息系统应用、遥感影像应用，E-mail：445877838@qq.com。

其中，影像成像光线的实际投影位置P可经由卫星影像定向信息计算得出。因此，本文提出影像成像参数（RPC参数）辅助的道路变形检测方法。该方法通过RPC参数计算影像光线的实际投影位置P，并计算P，Q2点，由此实现路桥变形区域快速检测。值得注意的是，由于变形大多出现在路桥区域，为排除非变形区域干扰，提升生产效率，首先利用路桥矢量数据定位出路桥区域，然后再对确定的路桥区域实施变形检测。算法的各处理步骤如下：①根据道路（矢量）数据，确定变形区域主要位置，并设置采样点间距 S；②对每一个采样点计算其所在道路方向与X轴的夹角 a；③对每一个采样点计算其与其后继采样点的高程差值 ED；④通过RPC文件计算该影像的光线参数，包括光线与垂直轴的夹角 θ，光线的水平投影在地面X轴方向投影的夹角 β；⑤计算采样点道路法向偏移的差值 $D\perp$；⑥计算采样点道路法向偏移的比率 R；⑦给定阈值 γ，若道路法向偏移的比率 $R>\gamma$，则判定该点为道路变形点，反之，则判定该点为非道路变形点。

2.1　光线参数计算

根据卫星影像的RPC文件信息，可建立地物及其影像投影点的模型关系。对于同一景正射影像，可认为各像点的投影方式近似为平行投影[6-8]。为便于后续计算，在步骤（4）中，将影像光线参数拆分为光线与垂直轴的夹角 θ，以及光线水平投影在地面 x 轴方向投影的夹角 β。具体处理过程如下：

记RPC中的offset点为 $(x_{\text{off}}, y_{\text{off}}, z_{\text{off}})$，将空间中的该点反向投影到影像上的位置（$r$，$c$）。将offset点的高程提高至 $z_{\text{off}}+h$，计算影像上的（r，c）位置投影到此高程上时点的坐标（x'_{off}，y'_{off}，$z_{\text{off}}+h$），此时，光线与垂直轴（z轴）的夹角 θ 可表示为：

$$\theta=\arctan\left(h/\sqrt{(x'_{\text{off}}-x_{\text{off}})^2+(y'_{\text{off}}-y_{\text{off}})^2}\right) \tag{1}$$

光线与水平轴（x轴）的夹角 β 可表示为：

$$\beta=\arctan\left(\frac{y'_{\text{off}}-y_{\text{off}}}{x'_{\text{off}}-x_{\text{off}}}\right) \tag{2}$$

2.2　道路变形建模

图2为道路变形的空间和平面投影示意图，其中沿道路方向的2个采样点 (p_1,p_2)，经过光线投影在正射影像上的位置为 (p'_1,p'_2)。通过建模可以得出，道路绝对偏移量 $B(\text{bias})$ 为道路高程 $RD(\text{road_elevation})$ 与地面高程的差值在正射影像上的投影长度，即

$$B=(RD-\text{DEM})\times\cot\theta \tag{3}$$

虽然地面高程可以用高精度的DEM获得，但是道路高程却较难获得，因此道路绝对偏移量无法计算。本方法通过计算相邻采样点的道路绝对偏移量的差值（下文简记为道路偏移差值 D）而非道路绝对偏移量解决该问题。

假设在一定距离内，即采样间隔，道路的高程变化可以忽略不计，那么沿道路线的相邻2个采样点 p_1, p_2 的道路高程值相同。记 p_1, p_2 高差为 ED，此时道路偏移差值为：

$$\begin{aligned}D&=\text{bias}_1-\text{bias}_2=\\&(RD_1-\text{DEM}_1)\times\cot\theta-(RD_2-\text{DEM}_2)\times\cot\theta=\\&(\text{DEM}_1-\text{DEM}_2)\times\cot\theta=ED\times\cot\theta\end{aligned} \tag{4}$$

由上式可以看出道路偏移差值 D 仅取决于采样点所在地面高程的差值（ED）在道路平面上的投影，而与道路本身的高程无关，从而计算得以简化。

在正射影像中，道路偏移差值 D 沿道路切线方向的偏移 $D\ /\!/$ 基本无法目视识别出来，因此本方法仅考虑道路偏移差值 D 沿道路法向方向的偏移 $D\perp$。

$$D\perp=D\times\sin(\alpha-\beta) \tag{5}$$

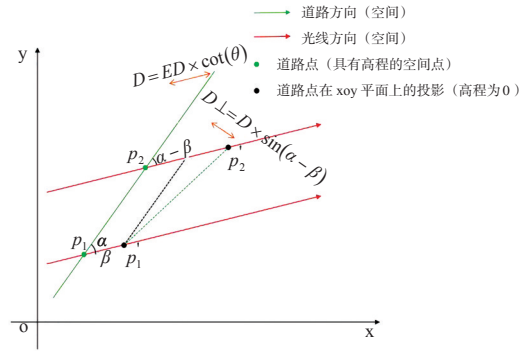


图2　投影面上道路与光线示意图

由于均匀采样时不同的道路真实采样间隔不尽相同，存在一些道路矢量折线间隔短于采样间隔，以及不同影像的分辨率不同导致道路法向偏移差值不便于统一阈值，记道路法向偏移比率 R。

$$R=\left(\frac{D}{\text{分辨率}}\right)/\left(\frac{S}{\text{分辨率}}\right)=D/S \tag{6}$$

本方法将道路法向偏移差值除以真实采样距离得到道路法向偏移比率，以该比率作为道路变形点的判定。

3　实验与分析

3.1　测试数据集

为验证方法的有效性，挑选了4景异源卫星影像作为测试数据。包括：SuperView和wordview影像

（0.5 m分辨率）；GF2、GF7和BJ2影像（1 m分辨率）；GF6和ZY3影像（2 m分辨率）。所有影像均经过融合、正射纠正处理。影像内容包含高架，桥梁等易变形区域，配合广东省1∶10 000比例尺的DEM和电子矢量地图。

3.2 路桥扭曲变形检测

将上述实验数据进行道路变形检测，设置采用采样间隔15 m，设定法向偏移比率阈值为0.05，则法向偏移比率大于0.05的点会被输出，认为该点是道路变形点。

结果表明，检测出的变形点处均有目视可见的扭曲现象，且在非变形点处道路平滑完整；只有一个点被检测出来且该点确实发生了道路变形，而其他地方在截图所示的分辨率下也并无明显变形。上述实验结果表明，该方法的检测准确率较高。事实上，单位实际生产过程中对于道路变形的要求更为严格，此时可以将阈值设定更低以保证查全率[9-10]。

3.3 方法评价

3.3.1 定性评价

经过正射纠正后的影像部分路桥区域存在严重扭曲，通过本文提出的方法可实现路桥扭曲变形区域的快速定位，在进行局部纠正，即可改善影像中道路扭曲现象。

3.3.2 定量评价

为进一步查看本文方法在实际DOM生产在中的可行性及检测效率，通过对比人工检测和本文提出的检测方法，从检测效率、查准率、查全率3方面对本文方法进行分析以及评价。

人工检测效率基于本单位长期从事正射影像生产，根据经验评估上述4景测试数据集道路扭曲变形耗时不少于7.5 h，本文检测方法耗时有程序运行中自动计时结果约0.5 h。

人工检测使用作业员人工标注的道路变形点作为真值点，假定人工检查结果全部确定为变形区域，本文方法输出的检查点与人工标注的道路变形点相近，则认为检测正确即为正样本，反之为负样本。查准率、查全率计算方法如下：

$$查准率=检查点正样本数/检查点总数 \quad (7)$$

$$查全率=检查点正样本数/真值点数 \quad (8)$$

运算结果如表1，从表中可以得出以下结论：①采用本文提出的检查方法，质检员的工作效率大大提高，路桥扭曲变形检查耗费的时间只有人工方法的6.6%；②正确率能够达到98.5%，查全率97.7%，经核查，漏检的主要原因是部分人工检测认为是扭曲变形，但此处DEM过渡自然，扭曲变形非常微小，相邻采样点高差在限值范围内。针对这一类微小变形区域，可根据实际作业需求，通过调整算法阈值找出更多疑似变形区域，再辅以人工筛查判别筛除错检区域。

表1 人工检测和本文检测方法定量估计

方法类型	检测效率/h	检查点（正样本/负样本）	真值点数	查准率/%	查全率/%
人工检查	7.5	7 191	7 191	100	100
本文检测	0.5	7 026/107		98.5	97.7

4 结 语

本文针对卫星正射影像制作中路桥扭曲变形人工查找效率低、自动查找难等问题，提出了一种卫星正射影像路桥扭曲变形自动探测方法。实验结果表明，该方法对多尺度、多元严重、中度和轻微的拉花变形的自动检测都有较好的适用性和稳定性，不仅能够定位拉花变形的区域，还能够较为准确地提取拉花变形区域的矢量范围，有利于提高正射影像制作与质检效率。

参考文献

[1] 马瑞峰,杜全叶,张力,等. 三调正射影像生产中道路扭曲的快速纠正方法[J]. 全球定位系统,2018,43(6):44-50

[2] 王武仕,赵羲. 正射影像纠正高架路桥扭曲的解决方法[J]. 测绘技术装备,2014,16(2):42-67

[3] 姜韶,蒋红彪,马辉. 大比例尺DOM变形预测方法[J]. 测绘,2017, 40(2):84-86

[4] 罗鼎,袁超,李胜,等.山地地区高分卫星影像正射纠正[J]. 测绘科学,2015,40(6):129-133

[5] 周丽娟,李朋龙. 山地区域航空正射影像拉花变形自动检测方法[J]. 测绘与空间地理信息,2020,43(6):88-94

[6] 张祖勋,张剑清. 数字摄影测量学[M]. 武汉:武汉大学出版社,2012

[7] 张剑清,张勇,郑顺义,等. 高分辨率遥感影像的精纠正[J]. 武汉大学学报(信息科学版),2004(11):994-998

[8] 张平. 数字正射影像的制作技术及问题探讨[J]. 测绘通报,2003(10):28-30

[9] 张永军,万一,史文中,等. 多源卫星影像的摄影测量遥感智能处理技术框架与初步实践[J]. 测绘学报,2021,50(8):1 068-1 083

[10] 崔浩,张力,艾海滨,等.利用基准色调的大范围卫星影像色彩一致性处理算法[J]. 测绘学报,2017,46(12):1 986-1 997