

文章编号 1004-924X(2012)02-0387-08

## 影响测绘相机匹配精度的辐射指标量化

智喜洋\*, 张伟, 侯晴宇, 曹移明

(哈尔滨工业大学空间光学工程研究中心, 黑龙江 哈尔滨 150001)

**摘要:**考虑测绘相机的辐射指标对影像匹配精度的影响,对相机辐射指标的量化进行研究,建立了辐射指标与影像匹配精度之间的关系模型,为确定测绘相机辐射指标提供理论支持。推导出了最小二乘影像匹配精度的计算模型,提出影响匹配的主要因素,包括成像场景特性、传递函数(MTF)、信噪比(SNR)与辐射畸变(RD);对上述因素产生的像质退化进行建模与仿真,结合最小二乘匹配以及遗传算法的BP神经网络模型(GABPNN)建立辐射指标与匹配精度之间的数值模型;最后利用仿真与在轨获取的遥感影像数据验证模型。试验结果表明,该模型估算精度 $<0.01$  pixel。利用该模型在匹配误差 $<0.1$  pixel的测绘需求下,分析出相机的辐射指标应满足 $MTF_N > 0.08$ 、 $SNR > 45$ 以及 $RD < 4\%$ 。

**关键词:**测绘相机;辐射指标;匹配误差模型;遗传算法反向传播神经网络(GABPNN)

**中图分类号:**V447.3;TP391 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/OPE.20122002.0387

## Quantification for radiometric specifications impacting on matching accuracy of mapping camera

ZHI Xi-yang\*, ZHANG Wei, HOU Qing-yu, CAO Yi-ming

(Research Center for Space Optical Engineering, Harbin Institute of Technology,  
Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China)

\* Corresponding author, E-mail: zhibofa1230@yahoo.com.cn

**Abstract:** In consideration of the effect of radiometric specification of a mapping camera on the matching accuracy of imaging, the quantification of main radiometric specifications are analyzed, and the mathematical model between them is developed to provide theoretical foundations for determining the specifications of the mapping camera. Firstly, Least Squares Image Matching Algorithm (LSIM) is deduced mathematically, and then the main factors impacting matching accuracy are presented, including the scene characteristics, Modulation Transfer Function (MTF) for an imaging system, Signal to Noise Ratio (SNR) and Radiometric Distortion (RD) metrics. Then, the image degradation owing to the above factors is modeled and simulated. Based on LSIM, the mathematical model between matching accuracy and radiometric specifications is developed using Genetic Algorithm and Back-propagation Neural Network (GABPNN). Finally, the model is verified using simulated images and on-orbit images. Experimental results indicate that the model precision is less than 0.01 pixels. It suggests that when the  $MTF_N$  is set to be greater than 0.08, SNR greater than 45 and RD less than 4% based

收稿日期:2011-07-14;修订日期:2011-08-12.

基金项目:国家自然科学基金资助项目(No. 61007008)

on the model, the error of matching accuracy can be less than 0.1 pixel.

**Key words:** mapping camera; radiometric parameters; matching error model; Genetic Algorithm and Back-propagation Neural Network (GABPNN)

## 1 引言

航天测绘是测绘相机从不同角度摄取立体影像,并经立体量测对目标进行精确定位的过程。影响目标定位精度的因素包括卫星姿态、摄站位置、相机内方位元素以及几何畸变等。目前,在测绘相机几何指标研究方面已开展了大量工作<sup>[1-4]</sup>并建立了较完善的几何指标分析与量化方法。相对而言,在相机辐射指标方面,如传递函数(MTF)、信噪比(SNR)与辐射畸变(RD)的量化一直沿用侦察相机的要求,指标的提出依据不强,很少依据测绘需求提出对辐射指标的量化要求。然而这些指标决定成像质量,它们在影像上产生的物理效应包括模糊、噪声、灰度偏差等,均会降低立体量测的精度,特别是在高精度立体量测中更为明显。在测绘摄影测量处理中,以影像匹配代替人眼立体量测,影像匹配是目标定位的基础,匹配精度直接决定目标定位精度。因此,随着大比例尺测图和高精度定位需求的日益提高,研究辐射指标与匹配精度之间的误差传递关系尤为重要。

影像匹配精度与匹配算法和影像质量密切相关。最小二乘影像匹配算法(LSIM)是摄影测量处理中公认的可靠、高精度的匹配算法,精度可达到亚像素级<sup>[5]</sup>。本文在固定LSIM的前提下,理论分析影响匹配精度的主要因素,并仿真研究匹配精度随MTF、SNR以及RD的变化规律,建立它们之间的误差传递关系,即匹配误差模型,据此提出基于匹配误差模型的相机辐射指标量化方法。以匹配精度小于0.1 pixel为应用需求,给出了相关的量化指标。

## 2 影像匹配精度的影响因素

### 2.1 匹配影响因素的理论分析

立体影像灰度分布可通过几何与辐射变化描述,LSIM是在影像匹配中引入几何与辐射变形参数,按影像对灰度差的平方和最小原则求解这些参数,其中几何变形参数的移位量精度就是匹

配精度。LSIM具有很好的适应性和定位精度,本文通过对其进行误差分析,提出影响匹配精度的主要因素。

设立体影像的左、右影像灰度分布分别为: $g_1(x, y) + n_1(x, y)$ ,  $g_2(x', y') + n_2(x', y')$ 。其中 $n_1, n_2$ 分别为 $g_1, g_2$ 中存在的随机噪声。最小二乘匹配就是以最小化式(1)为目标,来估计辐射与几何变形参数 $\beta = (h_0, h_1, a_0, a_1, a_2, b_0, b_1, b_2)^T$ ,

$$\sum_{x, y \in \Gamma} [g_1(x, y) - h_0 - h_1 g_2(a_0 + a_1 x + a_2 y, b_0 + b_1 x + b_2 y)]^2, \quad (1)$$

其中, $\Gamma$ 为影像中的某个窗口。令 $G_1, G_2$ 分别为窗口 $\Gamma$ 中左右影像灰度分布序列,令

$$f_{x, y}(\beta) = h_0 + h_1 g_2(a_0 + a_1 x + a_2 y, b_0 + b_1 x + b_2 y)$$

$F(\beta)$ 为 $\{f_{x, y}(\beta)\}_{x, y \in \Gamma}$ 组成的灰度分布序列函数, $F(\beta)$ 对 $\beta$ 的偏导矩阵为 $H(\beta)$ 。设第 $i$ 次迭代结果为 $\beta^i$ ,根据一阶Taylor近似,有

$$\beta \approx \beta^i + [H^T(\beta^i) H(\beta^i)]^{-1} H^T(\beta^i) \cdot [G_1 - F(\beta^i)], \quad (2)$$

式(2)迭代若干次后可得到参数的估计值 $\hat{\beta}$ 。

根据最小二乘估算公式,参数 $\beta$ 估计精度为 $\text{cov}(\beta) = \text{cov}[G_1 - F(\hat{\beta})] \cdot \text{diag}[(H^T \cdot H)^{-1}]$ ,

式中, $\text{cov} = \sigma^2$ 为影像方差, $\text{cov}(\beta)$ 表示 $\beta$ 估计精度, $\text{diag}(\cdot)$ 表示矩阵对角元素。则匹配误差为

$$\begin{aligned} \sigma(x) &= \sqrt{\sigma(a_0)^2 + [\sigma(a_1) \cdot x]^2 + [\sigma(a_2) \cdot y]^2} \\ \sigma(y) &= \sqrt{\sigma(b_0)^2 + [\sigma(b_1) \cdot x]^2 + [\sigma(b_2) \cdot y]^2} \end{aligned}, \quad (4)$$

其中, $\sigma(x), \sigma(y)$ 分别为像素 $(x, y)$ 处 $x$ 方向和 $y$ 方向的匹配误差, $\sigma(a_0), \dots, \sigma(b_2)$ 为参数估计精度。

观察式(3),(4)可知,匹配精度主要取决于 $[G_1 - F(\hat{\beta})]$ 和 $\text{diag}[(H^T \cdot H)^{-1}]$ 。 $[G_1 - F(\hat{\beta})]$ 反映影像的噪声。由 $\text{diag}[(H^T \cdot H)^{-1}]$ 中的元素可知,影响参数估计精度的因素有 $\sum (\frac{\partial g_1}{\partial x})^2$ 和 $\sum (\frac{\partial g_2}{\partial y})^2$ (影像灰度梯度)。由乘积项 $\text{cov}[G_1 - F(\hat{\beta})] \cdot \text{diag}[(H^T \cdot H)^{-1}]$ 可知,影响参数估计

精度的因素还包括  $\frac{\sigma_g}{\sigma_{\partial b_2/\partial x}}$  (影像空间结构) 与

$$\frac{\sum g^2}{\sum \sigma_{\text{noise variation}}^2}$$

相关联的参数为信噪比(SNR):

$$\text{SNR} = 20 \log_{10} \left( \frac{1}{M \times N} \frac{\sum g^2}{\sigma_{\text{noise variation}}^2} \right), \quad (5)$$

影像空间结构是场景的固有特性在影像上的反映。灰度梯度与影像空间结构、模糊、噪声和灰度偏差密切相关。模糊、噪声和灰度偏差分别是成像系统 MTF、SNR、相对辐射定标精度在影像上的反映。本文将相对辐射定标精度定义为辐射畸变(RD)。因此,影响匹配的因素可归结为场景特性、MTF、SNR 以及 RD。

### 2.2 匹配影响因素的建模与仿真

为研究匹配精度与场景特性、相机 MTF、SNR 及 RD 之间的关系,本文利用典型场景的高分辨率立体影像来模拟真实场景,依据各种物理效应引入到成像过程中的顺序,分别从频域和空域对它们进行模拟。首先通过 MTF 模型表征成像系统各个组成单元空间的线性传递特性,模拟模糊效应,再对模糊后的影像进行 4 倍欠采样来模拟探测器采样效应,引入探测器输入与输出之间的非线性响应模型来模拟辐射畸变效应,加入噪声来模拟噪声效应,进而获得大量 MTF、SNR 与 RD 的仿真影像。成像过程表示为

$$I(x, y) = E[\text{FFT}^{-1}(\text{FFT}(s(x, y)) * \text{MTF}_c)(x, y) \times \sum_{i,j} \delta(x - j\Delta_x, y - i\Delta_y)] + n, \quad (6)$$

式中,  $I(x, y)$  表示仿真影像,  $s(x, y)$  表示成像系统摄影的场景信息,它是对高分辨率影像经均值滤波和欠采样后,近似不含模糊、噪声与辐射畸变的影像,  $\Delta_x$  与  $\Delta_y$  表示探测器采样间隔,  $\text{MTF}_c$  为相机传递函数,  $E$  表示探测器非线性响应模型,  $n$  表示噪声,  $\text{FFT}$ 、 $\text{EET}^{-1}$  分别表示傅里叶正、逆变换,  $*$  表示卷积运算。

#### 2.2.1 表征场景的影像结构参数

匹配精度与场景特性密切相关,因此要选择能够反映场景特性的影像结构特征参数作为匹配误差模型的输入向量,并且此参数应与 MTF、SNR 及 RD 独立,这主要是将影像中直接与匹配误差有关的场景特性参数和相机辐射指标区分开。为此,本文引入半变异图  $\gamma(h)$ <sup>[6]</sup>,它可以很

好地表征结构复杂的城镇与结构均一的平原水田的场景特性,且  $\gamma(\infty)$  近似为影像方差  $\sigma$ 。在遥感领域,常利用式(7)来逼近  $\gamma(h)$

$$\gamma(h) = e^c \cdot h^b \cdot e^{a h^2} \quad (a, b, c \in R^3), \quad (7)$$

式中  $a, b, c$  为景物结构参量。

此参量在景物结构平面上的投影坐标  $(X_\Delta, Y_\Delta)$  能够反映影像场景信息,且与 MTF、SNR 独立<sup>[6]</sup>。

RD 对  $\gamma(h)$  曲线的影响如图 1 所示。从图中可以看出  $\gamma(h)$  受 RD 的影响很小,显然  $(X_\Delta, Y_\Delta)$  也与 RD 彼此独立。

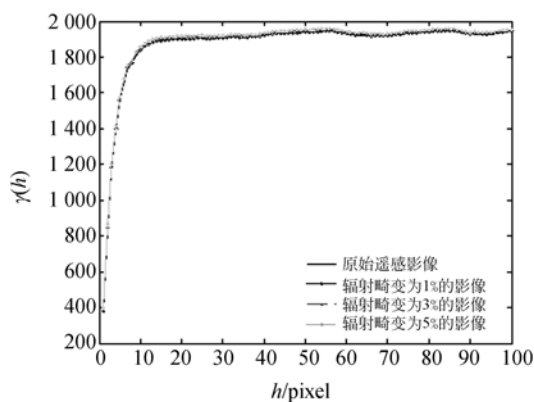


图 1 加入 RD 后影像与原影像  $\gamma(h)$  曲线的比较  
Fig. 1 Curves of  $\gamma(h)$  of original image and the image with added radiometric distortion (RD)

因此,本文采用  $(X_\Delta, Y_\Delta)$  描述场景在影像上体现的空间结构特性。

#### 2.2.2 调制传递函数(MTF)

MTF 在影像效果上表现为模糊,在线性空间不变系统下,相机系统总  $\text{MTF}_c$  可表示为光学系统和探测器系统各环节 MTF 的乘积<sup>[7]</sup>。本文通过频域卷积  $\text{MTF}_c$  模拟 MTF 在影像上产生的模糊效应。

#### 2.2.3 信噪比 SNR

SNR 在影像效果上表现为噪声,在遥感领域,噪声均可用加性高斯白噪声作为模型来描述<sup>[8-10]</sup>,因此,本文通过加入不同标准方差的高斯白噪声模拟成像系统 SNR 在影像上产生的噪声效应,并定义 SNR 如式(5)所示。

#### 2.2.4 辐射畸变 RD

探测器输出放大器的非线性和转移效率等会引起像元的非线性效应,器件的非均匀性会造成

不同像元间响应度和偏置不同,在影像上表现为灰度偏差,尤其是在高精度的数据采集测量中更为明显<sup>[11]</sup>。本文定义的辐射畸变是指对上述因素相对辐射校正后的残差,采用指数函数模拟像元的非线性效应<sup>[12]</sup>,用服从正态分布的随机数生成不同像元对应的指数函数,模拟像元间的非均匀性,利用平均行标准差法<sup>[13]</sup>计算辐射畸变值。计算方法为:

生成灰度值为 0~255 的标准灰度如图 2 (左)所示,图 2(右)为加入非线性与非均匀性效应后的仿真图。计算其每列像素灰度的平均值,得到一个平均行,然后计算该行像素灰度的标准差,再除以整幅图的平均灰度值,即得到辐射畸变值。

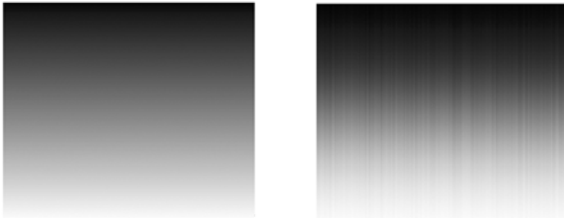


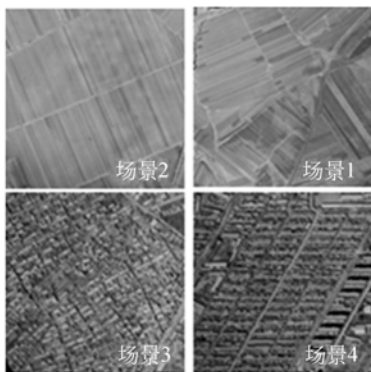
图 2 用于计算辐射畸变值的标准图形与仿真图

Fig. 2 Standard pattern and simulated image added with RD

### 2.3 匹配影响因素的仿真分析

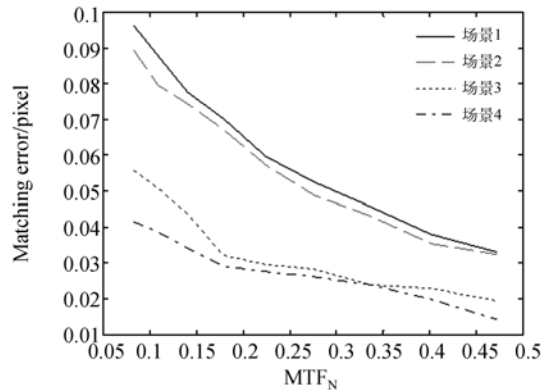
以下为基于参数已知的仿真影像,研究匹配误差与影响因素之间的关系。图 3 分别绘制了城镇、平原水田场景影像匹配误差随  $MTF_N$ (奈奎斯特频率)、SNR 与 RD 的变化规律曲线。

从图 3 中可以看出,匹配误差与  $MTF$ 、SNR 及辐射畸变之间均呈现非线性关系,相同成像特



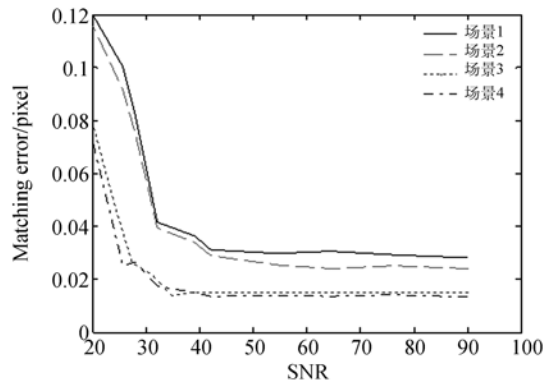
(a) 城镇与平原水田场景

(a) Landscapes of towns and fields



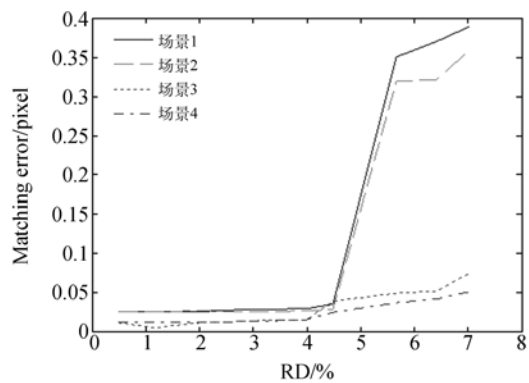
(b) 匹配误差与  $MTF_N$  之间的关系

(b) Relationship between matching errors and  $MTF_N$



(c) 匹配误差与 SNR 之间的关系

(c) Relationship between matching errors and SNR



(d) 匹配误差与辐射畸变之间的关系

(d) Relationship between matching errors and RD

图 3 影像匹配误差随  $MTF_N$ 、SNR 及 RD 变化曲线

Fig. 3 Variations of matching errors with  $MTF_N$ , SNR and RD

性对不同场景影像匹配结果的影响不同,对平原水田场景的影响略大于城镇场景;从图 3(c)可以看出,匹配误差随 SNR 值的增大不断减小。当  $SNR > 40$  后,匹配误差幅度变化很小,SNR 对匹

配误差几乎没有影响;从图 3(d)可以看出,匹配误差随 RD 值的增大不断变大。当  $RD < 4\%$  时,对匹配误差的影响很小,当  $RD > 4\%$  后,对匹配误差的影响显著增大。

### 3 匹配误差模型建立

#### 3.1 基于遗传算法的神经网络模型的构建

从上面的分析可以看出,匹配误差与 MTF、SNR 以及 RD 呈现非线性关系,因此匹配模型的建立问题转化为解决非线性目标函数的优化问题。

首先用遗传算法优化初始权值,在解空间中定位出较好的搜索空间。然后用 BP 算法在这些小的解空间中搜索出最优解,既发挥神经网络的泛化映射能力,又使神经网络具有很快的收敛性及较强的学习能力。基于遗传算法的 BP 神经网络(GABPNN)的算法程序流程如图 4 所示。

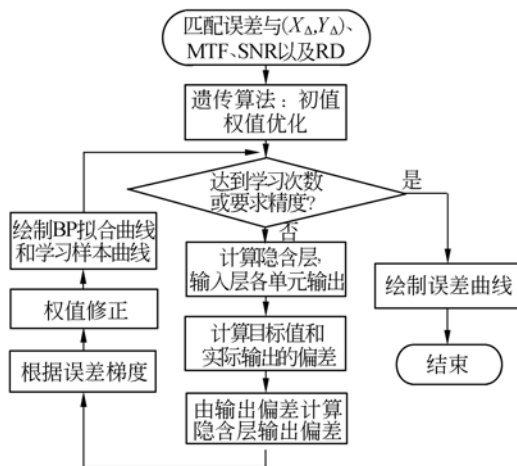


图 4 GABPNN 算法程序流程图

Fig. 4 Flowchart of GABPNN algorithm program

通过反复调整网络的结构对样本集进行训练,网络将自动建立起匹配误差与  $(X_{\Delta}, Y_{\Delta})$ 、MTF、SNR、RD 之间的某种非线性关系模型。

#### 3.2 训练样本的建立

为提高网络性能,我们选取 50 幅包含典型地面景物结构的航拍影像,如图 5 所示。根据 2.2, 每幅模拟  $MTF_N$  在  $[0.05, 0.5]$  之间 20 个 MTF

等级、SNR 在  $[20, 80]$  之间 20 个等级、RD 在  $[1\%, 6\%]$  之间 20 个等级,共 3 000 组影像数据。

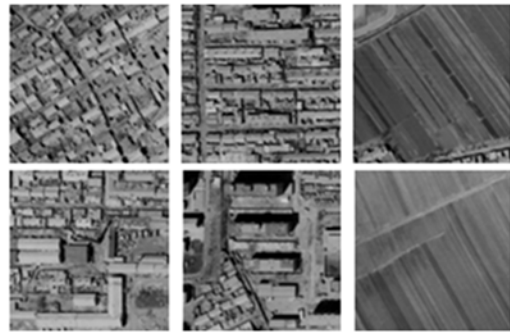


图 5 典型地面场景结构影像图(密集城镇、稀疏城镇场景与平原水田场景)

Fig. 5 Images examples of typical landscapes (dense towns, sparse towns and field landscapes)

#### 3.3 网络结构的设计

本文采用含有 1 个输入层、1 个隐层和 1 个输出层的 3 层网络来逼近匹配误差模型。采取“试”算法确定隐层节点数,输入层与隐层之间选用 S 型激活函数,隐层与输出层之间选用纯线性函数。选取 Levenberg-Marquardt 法作为训练算法。通过观察网络对未训练过的测试影像的匹配误差评价结果,根据测试误差最小来确定最终的网络结构。

#### 3.4 网络训练结果

经过网络的实际训练结果的比较,选定隐层节点数为 20,此时网络的全局收敛速度较快,且误差较小。图 6 列出隐层节点数为 20 时的模型误差曲线,可以看出,经 98 次迭代学习,网络的学习精度达到 0.000 1,学习速度较快,能够满足要求。

利用 GABPNN 解决非线性逼近问题,只要训练样本足够多,并具有典型性与代表性,就可以使网络达到最佳的测试精度。

根据匹配误差与 MTF<sub>N</sub>、SNR 及 RD 之间的数值关系,可由匹配误差要求对 MTF<sub>N</sub>、SNR 及 RD 进行约束。结合图 3(c)和 3(d)的分析结果,对 MTF<sub>N</sub> 进行量化时,假设 SNR=80, RD=1%, 改变 MTF<sub>N</sub>, 计算匹配误差,以匹配误差小于 0.1 pixel 为约束条件,得出当且仅当 MTF<sub>N</sub> 不小于 0.08, 匹配误差 < 0.1 pixel。同理可对 SNR 与

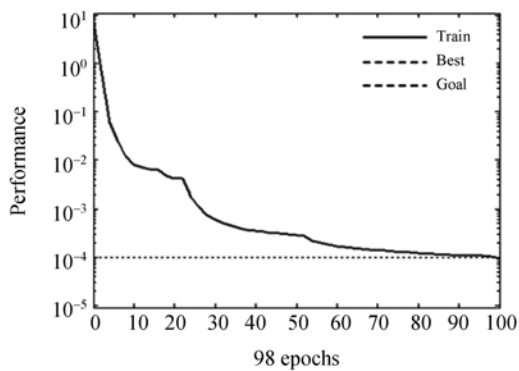


图 6 网络训练误差曲线

Fig. 6 Training error curve

RD 进行量化, 得出 SNR 不小于 45, RD 小于 4%。

## 4 匹配误差模型的试验验证

### 4.1 基于仿真影像的模型验证

仿真实验方案流程如图 7 所示。

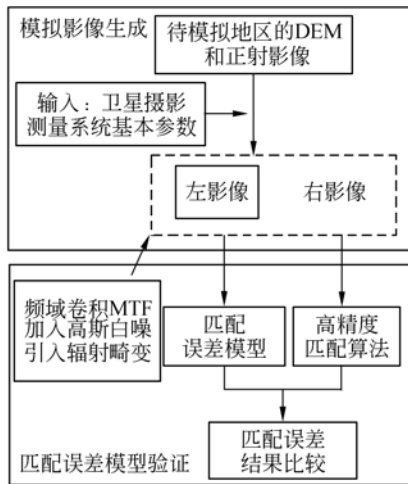


图 7 试验流程图

Fig. 7 Flowchart of experiment

模拟两线阵 CCD 影像是匹配误差模型验证的最基本步骤, 主要目的是为模型的仿真实验验证提供基础数据支持。本文利用卫星正射影像和数字高程模型(DEM)数据, 通过共线条件方程对 CCD 影像进行逐像元模拟, 其过程可看作是正射影像生成的逆过程, 基本思路是: 首先利用待模拟生成两线阵 CCD 影像的摄影测量参数和 DEM 数据, 逐点计算 DEM 对应前视、后视影像的像点坐标; 然后将正射影像灰度值赋于对应像点处, 获

得仿真影像, 此影像不包含模糊、噪声与灰度偏差。

从仿真影像中截取多组大小为  $512 \text{ pixel} \times 512 \text{ pixel}$  的城镇、平原水田场景区域影像对, 分别频域卷积  $MTF_C$ , 使  $MTF_N$  在  $[0.05, 0.3]$  之间, 引入 RD, 使 RD 在  $[1\%, 7\%]$  之间, 加入高斯白噪声, 使 SNR 在  $[30, 70]$  之间, 将匹配误差模型计算结果与高精度匹配算法<sup>[14]</sup> 计算获得匹配误差实际值进行比较, 表 1 列出典型值情况下匹配误差的对比结果。

表 1 模型解算结果与实际结果的比较

Tab. 1 Comparison of predicted results by GABPNN and the derived ones by algorithm with high accuracy

(pixel)					
$MTF_N$	SNR	RD/%	预测值	实际值	残差
0.1	40	3	0.098 9	0.095 9	0.003
0.1	60	3	0.091 0	0.089 1	0.001 9
0.1	70	3	0.089 9	0.088 9	0.001
0.2	60	3	0.066 3	0.066 2	0.000 1
0.15	60	3	0.079 9	0.078 8	0.001 1
0.05	60	3	0.194 3	0.131 3	0.063
0.1	60	1	0.087 6	0.087 2	0.000 4
0.1	60	6	0.264 9	0.211 2	0.053 7
0.1	60	7	0.385 7	0.303 0	0.082 7
0.1	60	3	0.079 1	0.080 0	0.000 9
0.1	60	3	0.063 1	0.067 4	0.004 3

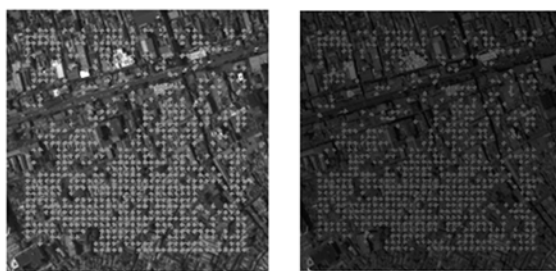
从表 1 可以看出, 当  $MTF_N$  值  $> 0.05$ , RD  $< 6\%$  时, 模型估计误差  $< 0.005 \text{ pixel}$ 。实际应用中影像基本要求  $MTF_N > 0.05$ , RD  $< 6\%$ 。因此, 通过匹配误差模型计算结果能准确逼近真实值。

### 4.2 基于实拍影像的模型验证

下面采用实拍遥感影像对模型的有效性与泛化能力作进一步验证。试验选取的影像数据为 IKONOS 卫星全色立体影像。

从影像中分别截取多组大小为  $512 \text{ pixel} \times 512 \text{ pixel}$  的城镇、平原水田区域场景影像。从影像中提取  $MTF^{[6]}$ ,  $MTF_N$  为 0.175 4, 再提取噪声标准差<sup>[15]</sup>, 利用式(5)计算 SNR 为 54, 影像 RD 为  $5\%$ <sup>[16]</sup>。利用本文建立的匹配误差模型计算匹配误差, 与利用高精度匹配算法计算获得的匹配误差真实值进行比较。仅列出一组立体影像匹配试验结果, 如图 8 所示。试验结果表明: 匹配误差

模型能很好地逼近匹配误差真实值,平均误差小于 0.01 pixel。



(a) 前视影像 (b) 后视影像

(a) Foreward looking image (b) Afterward looking image

图8 影像匹配结果

Fig.8 Results of image matching

## 5 结 论

为达到依据匹配精度需求量化相机辐射指标

### 参考文献:

- [1] 王智,张立平,李朝辉. 三线阵立体测绘相机构像及误差模型的建立[J]. 光电工程, 2010, 37(1): 95-100.  
WANG Z, ZHANG L P, LI CH. Imaging and error model of three-linear tridimensional mapping camera[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2010, 37(1):95-100. (in Chinese)
- [2] 胡莘,曹喜滨. 三线阵立体测绘卫星的测绘精度分析[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2008, 40(5):695-699.  
HU X, CAO X B. Analysis on precision of stereo mapping microsatellite using three-line array CCD images[J]. *Journal of Harbin Institute of Technology*, 2008,40(5):695-699. (in Chinese)
- [3] 袁枫,张继贤,杨明辉,等. 利用物理方法确定外方位元素的卫星立体摄影测量的精度分析[J]. 测绘科学, 2006, 31(5):30-31.  
YUAN F, ZHANG J X, YANG M H, et al.. The precision analysis of satellite stereophotogrammetry using physical method to determine exterior orientation elements[J]. *Science of Surveying and Mapping*, 2006, 31(5):30-31. (in Chinese)
- [4] 余俊鹏,孙世君. 测绘相机内方位元素在对地定位中的误差传播[J]. 航天返回与遥感, 2010,31(2): 16-22.  
YU J P, SUN SH J. Error propagation of interior orientation elements of surveying camera in ground positioning[J]. *Spacecraft Recovery Remote Sensing*, 2010,31(2):16-22. (in Chinese)
- [5] 张祖勋,张剑清. 数字摄影测量学[M]. 武汉:武汉大学出版社, 2002.  
ZHANG Z X, ZHANG J Q. *Digital Photogrammetry* [M]. Wuhan: Wuhan University Press, 2002. (in Chinese)
- [6] DELVIT J M, LÉGER D, ROQUES S, et al.. Modulation transfer function measurement from non specific views[J]. *SPIE, Remote Sensing*, 2002, 4885: 34-45.
- [7] 田铁印,王红,谷凤安,等. 三线阵立体测绘相机光学系统设计[J]. 光学精密工程, 2009,17(11): 2692-2698.  
TIAN T Y, WAN H, GU F A, et al.. Optical System Design of Three-line Array Stereoscopic Mapping Camera[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2009, 17(11):2692-2698. (in Chinese)
- [8] JAIN A K. Fundamentals of digital image processing, Prentice Hall, 1989.
- [9] ROUGÉ B. Théorie de la chaîne image et restauration d'image optique à bruit final fixé, Mémoire d'Habilitation à Diriger des Recherches, France, 1997.
- [10] NI C, GUAN Z Q. Noise analysis and restrain in the fusion process of remote sensing[J]. *IEEE*, 2010,3:490-495.
- [11] 程万胜,赵杰,蔡鹤皋. CCD像素响应非均匀的

- 校正方法[J]. 光学 精密工程, 2008, 16(2):314-318.
- CHENG W SH, ZHAO J, CAI H G. Correction method for pixel response nonuniformity of CCD [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2008, 16(2):314-318. (in Chinese)
- [12] KRAUSE K. Quickbird relative radiometric performance and on-orbit term trending[J]. *Proceedings of the SPIE*, 2006, 6296.
- [13] 胡永富, 张宇烽. 空间相机相对辐射定标精度分析[J]. 航天返回与遥感, 2007, 28(4):54-57.  
HU Y F, ZANG Y F. Analysis of relative radiometric calibration accuracy of space camera [J]. *Science of Surveying and Mapping*, 2007, 28(4):54-57. (in Chinese)
- [14] RADHIKA V N, KARTIKEYAN B, KRISHNA B, *et al.*. Robust stereo image matching for spaceborne imagery[J]. *IEEE Trans Geosci. Remote Sens.*, 2007, 45(9): 2993-3000.
- [15] GHAZAL M, AMER A. Homogeneity localization using particle filters with application to noise estimation[J]. *IEEE Trans Image Processing*, 2011, 20(7):1788-1796.
- [16] PAGNUTTI M, RYAN R, KELLY M, *et al.*. Radiometric characterization of IKONOS multispectral imagery[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2003, 88:53-68.

#### 作者简介:



智喜洋(1982—),男,黑龙江哈尔滨人,博士研究生,主要从事航天相机成像质量评价与影像处理方面的研究。E-mail:zhibofa1230@yahoo.com.cn



曹移明(1982—),男,江苏泰兴人,博士研究生,主要从事空间红外相机性能评估与仿真方面的研究。E-mail:caoyiming888@126.com



侯晴宇(1982—),男,黑龙江绥化人,工学博士,讲师,主要从事红外图像处理、红外目标检测与跟踪方面的研究。E-mail:houbingyu@126.com

#### 导师简介:



张伟(1962—),男,黑龙江牡丹江人,工学博士,教授,博士生导师,主要从事空间光学工程与应用技术等方面的研究。E-mail:wzhang@hit.edu.cn