

空中侦察序列图像连续拼接的累积误差分析与消除

李从利¹⁾ 薛模根¹⁾ 冷晓艳²⁾ 卢伟¹⁾

¹⁾(解放军炮兵学院,合肥 230031) ²⁾(解放军63961部队,北京 100012)

摘要 分析研究了空中侦察序列图像连续拼接产生误差的原因,连续拼接中的误差累积与传播往往导致拼接图像质量难以接受甚至拼接过程失败,而拼接获取大视野战场毁伤全景图像具有重要军事应用价值;针对空中飘弋平台运动姿态复杂,成像模型难以建立的特点,提出了一种在连续拼接过程中变换基准图的拼接策略以消除累积误差的产生,通过对空中飘弋平台实拍序列图像和模拟仿真的序列图像进行拼接的实验结果表明,基准图的变换可大大减弱拼接过程中的累计误差影响,同时多次变换也会造成局部边缘的失真,但不影响后续的处理和使用,该策略的提出可为类似视点变化复杂的成像拼接提供误差消除方法和有效手段。

关键词 误差分析 误差消除 侦察序列图像 图像拼接

中图法分类号:TP391.41 文献标识码:A 文章编号:1006-8961(2008)04-0814-06

Analysis and Elimination on Aerial Recon Sequential Image Stitching Accumulative Error

LI Cong-li¹⁾, XUE Mo-gen¹⁾, LENG Xiao-yan²⁾, LU Wei¹⁾

¹⁾(Artillery Academy of PLA, Hefei 230031) ²⁾(63961 Unit of PLA, Beijing 100012)

Abstract In this paper we analyzed and researched the cause of the error during the aerial detection sequence continuous image stitching. The stitching of large visual battlefield damage panoramic image is important in military, but the accumulation of the error usually results in awful image quality or stitching process's failure. Aiming at the character of complicated movement pose of floating aerial platform and the difficulties to establishing imaging model, in the paper presents a method which can avoid accumulated errors by transforming the base-image in the continuous stitching process. The experiment with the floating aerial platform real time serial images and the simulated serial images proves that the transform of base-image can obviously weaken the accumulation of error in stitching, and repetitious transform can induce the local edge's distortion, but it does not have infection to the past-processing and application. We present an effective method to avoid errors in image stitching under the situations like complicated vision-transform.

Keywords error analysis, error elimination, recon sequential, image stitching

1 引言

对空中侦察序列图像进行连续拼接以获得宽视角的场景图,在军事应用中具有重要意义。而图像拼接的研究工作通常集中在拼接算法、变换模型、拼接精度和拼接速度等问题上,针对序列图像进行误差匹配的研究也是主要集中在两两相连帧间进行^[1],

当相邻两幅图像的重叠区域无明显特征,或者存在多个特征相似部分的伪匹配研究必须增加一些约束条件再进行求解^[2],但少有文献从整体上对拼接误差进行定量分析。目前,序列图像在连续拼接时,一般先对图像两两配准,然后将配准参数依次进行累计,那么相邻帧之间的配准误差会被逐渐扩大,造成误差的累积。如果参与拼接的图像数目较多,累积误差对最终的拼接结果影响就

会很大,导致拼接结果不理想,此时对拼接误差的研究就变得很迫切。

本文研究的序列图像由无人操纵空中飘弋平台拍摄获得,对其中的任意两帧图像的配准使用基于特征区域和灰度互相关的分层配准算法^[3]实现(以下简称算法1)。算法的基本思想是在第1层配准中用迭代阈值分割算法提取特征区域,以特征区域的形状属性作为配准信息,用归一化互相关进行相似性度量,实现粗配准;在第2层中以像素的灰度信息作为配准信息,用互相关系数进行相似性度量,实现精配准。该配准算法的几何变换模型为仿射变换模型,几何变换参数包括平移参数、旋转参数和缩放参数。该算法的配准精度较高,误差在一个像素范围内。

完成图像两两配准的工作后,接下来就要实现图像的连续拼接以获得大视场的战场侦察结果图。本文对连续拼接中的累积误差进行分析,并提出一种累积误差的消除策略,实现了多帧图像的连续拼接。

2 连续拼接的累积误差分析

图像拼接中误差的存在是必然,造成误差的原因很复杂。对于侦察评估子弹拍摄的序列图像,有以下原因造成拼接误差:

(1)由于不能获得侦察评估子弹的摄像平台在下降过程中的运动模型,故无法建立相应的侦察图像几何变换模型,因此在图像的两两配准时使用仿射模型对图像的几何畸变进行近似模拟。仿射模型只能包含摄像平台水平漂移、平面内旋转(偏航角变化)、高度变换造成的几何畸变^[4],无法模拟摄像平台的俯仰角、滚转角的变化,各个角度如图1所示。摄像平台的俯仰角、滚转角的变化会造成图像内比例尺呈线性变化^[5],如图2所示。

(2)仿射模型中的图像旋转形变是假设摄像平台在平面内绕镜头中心旋转,而在实际中这一点无法保证,摄像平台在平面内的旋转中心是不确定的,图3所示意的就是一种可能出现的情况。

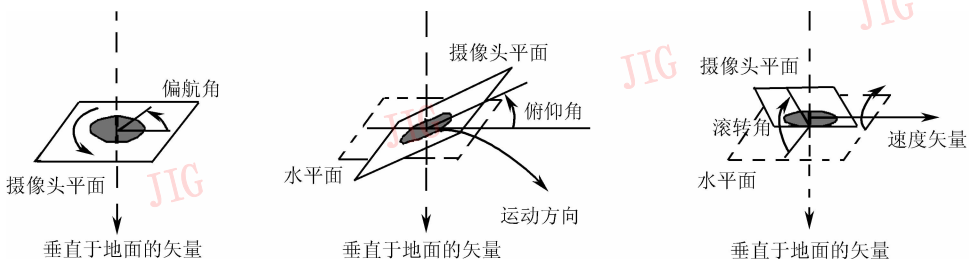


图1 摄像平台姿态角变化

Fig. 1 Stance change of photography platform

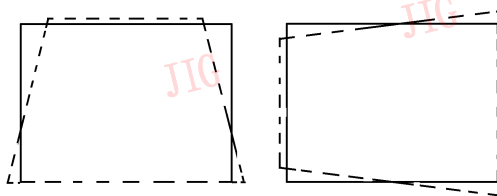


图2 比例尺线性变化

Fig. 2 Scale linearity change

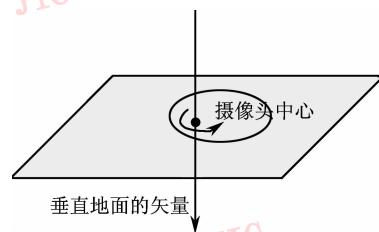


图3 不以摄像头为中心旋转的情况

Fig. 3 Rotation not by camera center

(3)相邻帧之间的配准参数求取是存在误差的。

(4)数字图像是离散数据,像素的坐标位置都为整数,对图像进行数学变换后,像素的坐标位置常变为浮点数,需要使用插值技术进行处理,会导致误差。

一般多幅图像进行拼接时采用两两配准、参数累计的拼接策略,文献[6]的拼接算法就是采取的此种策略(以下简称算法2)。当参与拼接的图像较少时,这种策略既简单又对拼接结果影响不大,但当连续拼接几十幅图像时,这种策略所产生的累积误差对拼接结果的影响就大得难以忽略。

由于造成累积误差的原因很复杂,有很多不可测的影响因素,这使分析和消除累积误差具有很大难度,有必要做一些假设。相邻帧间的位置误差是相邻帧间拼接误差的最主要因素,不妨假设接缝处的误差只源于相邻帧间的位置误差。由于各相邻帧间拼接位置的误差难以准确估计或计算,假设它们均为一个随机变量^[7,8]。设 n 帧图像 f_1, f_2, \dots, f_n 连续拼接,第 i 次配准的 x 方向平移误差、 y 方向平移误差、旋转误差和缩放误差分别为 $x_i, y_i, a_i, h_i, i = 1, 2, \dots, n$, 它们可以是各种适当的分布。

两两配准、参数累计的拼接策略的第 i 次配准是以 $f_i (1 \leq i < n)$ 为基准图, f_{i+1} 为待配准图,设配准参数集中的参数依次为 x 方向平移、 y 方向平移、旋转和缩放,所得配准参数集为 $M_i = \{X_i, Y_i, A_i, H_i\}$ 。图像 f_{i+1} 按累计参数变换到第 1 帧图像 f_1 的坐标系下,累计参数集为 $S_i = \{X_1 + X_2 + \dots + X_i, Y_1 + Y_2 + \dots + Y_i, A_1 + A_2 + \dots + A_i, H_1 + H_2 + \dots + H_i\}$, 累计参数是按加法和乘法计算。

(1) 随机误差在加法中的传递^[9]

设独立的随机变量 A, B, C, \dots , 它们的标准偏差为 s_A, s_B, s_C, \dots , 方差为 $s_A^2, s_B^2, s_C^2, \dots$, 则 $R = A + B + C + \dots$ 的方差为

$$s_R^2 = s_A^2 + s_B^2 + s_C^2 + \dots \quad (1)$$

即随机变量的和的方差等于各个方差之和。

(2) 随机误差在乘法中的传递^[9]

对于 $R = A \times B \times C \times \dots$ 有

$$\left(\frac{s_R}{R}\right)^2 = \left(\frac{s_A}{A}\right)^2 + \left(\frac{s_B}{B}\right)^2 + \left(\frac{s_C}{C}\right)^2 + \dots \quad (2)$$

即随机变量积的相对偏差的平方等于各个相对偏差的平方之和。

在加法和乘法中误差的传递很迅速。随着连续拼接的帧数增多,误差将会越来越大。图 4(a)、(b)是按基于特征区域和灰度互相关的分层配准算法,用基于两两配准、参数累计的拼接策略分别对 20 帧实拍序列图和 20 帧仿真序列图连续拼接的结果。可见,虽然两两配准的精度很高,但受累积误差的影响,连续拼接结果图发生了局部失配现象。

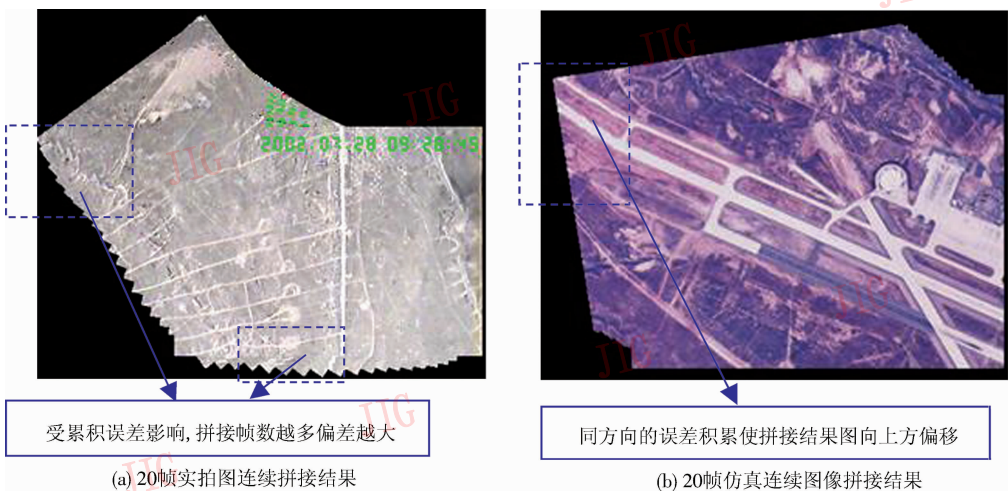


图 4 拼接结果

Fig. 4 The stitching result

3 变换基准图的策略避免累积误差

图像的连续拼接依赖于若干次两两拼接,虽然两两拼接中不可避免地存在误差,但可以通过一定的策略或技巧,控制连续拼接中的误差,使其尽可能地小。

在连续拼接中,基于两两配准、参数累计的拼接

策略是所有的配准最终以第 1 帧图像为基准图。为把后续帧转换到第 1 帧图像的坐标系下,将配准参数进行累计,而在参数的累计过程中,误差也被累计,使误差迅速积累。为避免误差的积累,设计并提出一种变换基准图的拼接策略。该策略是从本文所研究的空中侦察序列图像的拍摄实际情况出发提出的,基于以下两个条件:

(1) 图像的拍摄受战场环境所限,无法获得标

准的基准图,即没有指定的基准图。

(2) 图像配准时以仿射模型作为几何变换模型,即假设了摄像头是垂直于地面的,所拍图像都是正射投影,所以可以取任何一帧图像为基准图。

设 n 帧图像 f_1, f_2, \dots, f_n 连续拼接,配准参数集中的参数依次为 x 方向平移、 y 方向平移、旋转和缩放。第 i 次配准以 $f_i (1 \leq i < n)$ 为待配准图, f_{i+1} 为基准图,所得配准参数集为 $M_i' = \{X_i', Y_i', A_i', H_i'\}$ 。按集合 M_i' 中的配准参数将上次,即第 $i-1$ 次,配准的结果图 $f_{i-1,i}$ 变换到图 f_{i+1} 的坐标系下。这样每次图像变换都是按照本次图像配准的参数把上次配准的结果图变换到新的基准图坐标系下,不必进行配准参数的累计,也就没有误差的积累,每次变换的误差都是本次配准的误差,上次配准的误差不再向下传递。应用该策略的拼接过程中,基准图是不固定的,在不断变换的,如图5所示。

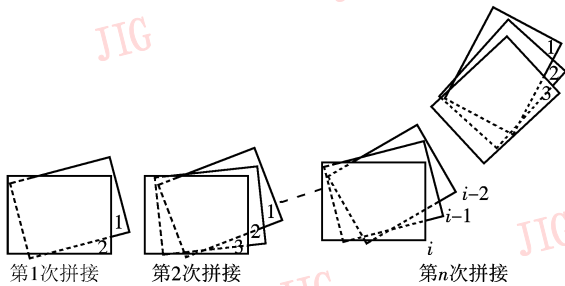


图5 变换基准图的拼接策略

Fig. 5 Stitching way by changing the base image

4 以中间帧为最终基准图减少图像失真

变换基准图的策略虽然可以避免连续拼接中误差的积累,但结果图中的部分区域要经过多次数学变换。例如连续3帧的拼接结果图像 $f_{2,3}$ 中有属于 f_1 的区域 M_1 ,有属于 f_2 的区域 M_2 和有属于 f_3 的区域 M_3 ,其中, M_1 经过了两次数学变换, M_2 经过了一次数学变换, M_3 没有经过数学变换。所以在变换基准图的策略下,拼接次数越多,第1帧图像经过的数学变换次数越多,而数学变换会导致图像失真。因为对图像进行缩放和旋转变换时,要用到插值技术,这些操作使得转换后的图像的某些像素点产生一定程度的失真。数学变换的次数越多,图像失真的情况越严重。

图像插值算法常用的有最邻近点插值、双线性

插值、sinc插值、多项式插值以及B样条近似等算法。经过对插值效果和运行时间的综合考虑,本文选用三次多项式插值。

为从整体上降低图像失真的程度,在拼接时从两端开始,以中间帧作为最后的基准图,这样可减少图像的数学转换次数。

设 n 帧图像 f_1, f_2, \dots, f_n 连续拼接。当 $n=3$ 时,第1次配准以第1帧图像为待配准图,第2帧图像为基准图,获得图像 $f_{1,2}$ 。第2次配准以第2帧图像为基准图,第3帧图像为待配准图,按这次配准的参数将图像 f_3 变换到图像 $f_{1,2}$ 的坐标系下,获得最后的结果图。当 $n>3$ 时,对前 $\lfloor \frac{n}{2} \rfloor$ 帧图像按变换基准图的策略顺序拼接,获得结果图 $f_{1, \lfloor \frac{n}{2} \rfloor}$,对后面的 $n - \lfloor \frac{n}{2} \rfloor$ 帧图像按变换基准图的策略逆序拼接,获得结果图 $f_{\lfloor \frac{n}{2} \rfloor + 1, n}$ 。最后以第 $\lfloor \frac{n}{2} \rfloor$ 帧图像为基准图,第 $\lfloor \frac{n}{2} \rfloor + 1$ 帧图像为待配准图,按这次配准的参数将图像 $f_{\lfloor \frac{n}{2} \rfloor + 1, n}$ 变换到图像 $f_{1, \lfloor \frac{n}{2} \rfloor}$ 的坐标系下,获得最后的结果图。如果从 f_1 到 f_n 都按变换基准图顺序拼接,最后的结果图中属于第1帧图像的区域要经过 $n-1$ 次数学变换,而以中间帧为最终基准图的方法中,结果图中属于第 n 帧图像的区域经过的数学转换次数最多, n 是偶数时转换 $\lfloor \frac{n}{2} \rfloor$

次, n 是奇数时转换 $\lfloor \frac{n}{2} \rfloor + 1$ 次。这样既没有增加算法复杂性和程序运行时间,又将图像失真的程度几乎降低一半。

5 实验与结论

按配准算法1,分别以基准图不变策略和变换基准图策略(从头至尾顺序拼接)对连续20帧实拍图进行拼接。其结果如图6(从头至尾顺序拼接,最后一帧为最终的基准图)所示,通过对图6(a)、(b)中主路的拼接效果观察可见,变换基准图拼接策略的优势显而易见。对连续20帧仿真序列图做同样实验,如图7(从头至尾顺序拼接,最后一帧为最终的基准图)所示。图7(a)为基准图不变策略的结果图,将图7(a)与母图图7(d)对比,观察图7(a)图左部的新生长区域,能发现连续帧的位置明显依次向下偏移,可见连

续拼接中误差不断传递,形成的累计误差对拼接结果影响很大;图 7(b)为变换基准图策略的结果图(从头至尾顺序拼接),其位置对准比图 7(a)准确,观察图 7(b)右下部分新生长区域能发现拼接出的道路平直,基本没有错位。但图 6(b)和图 7(b)中部分区域由于经过多次数学转换,导致图像失真,出现浮雕效果,对结果图的可视性有一定的影响。

为改进图像失真的问题,改变变换基准图策略中的从头至尾顺序拼接的方式,以中间帧为最终的基准图,前半部分顺序拼接,后半部分逆序拼接。按此策略对两个样本拼接,结果分别(以中间帧为最终的基准图)如图 6(c)、图 7(c),可见图像失真的情况大为改观。

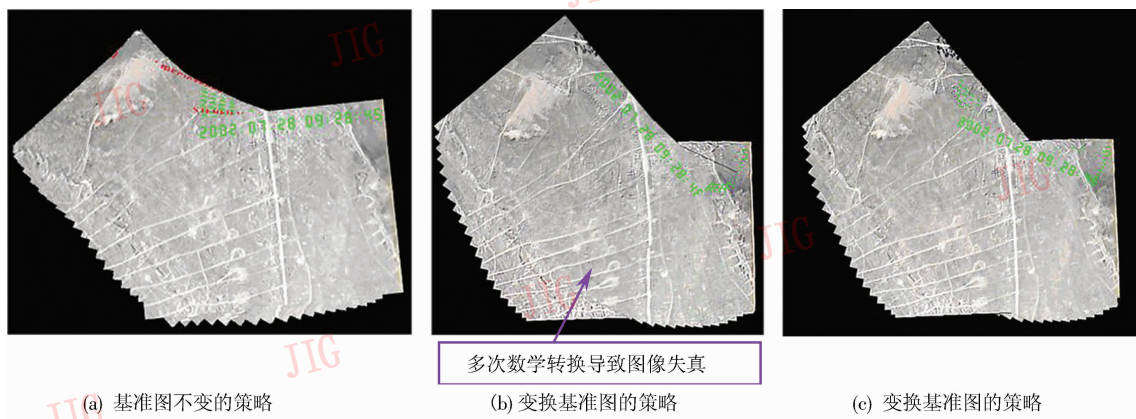


图 6 连续 20 帧实拍图按两种不同拼接策略的结果图

Fig. 6 The stitching result of 20 frames real images by two different way

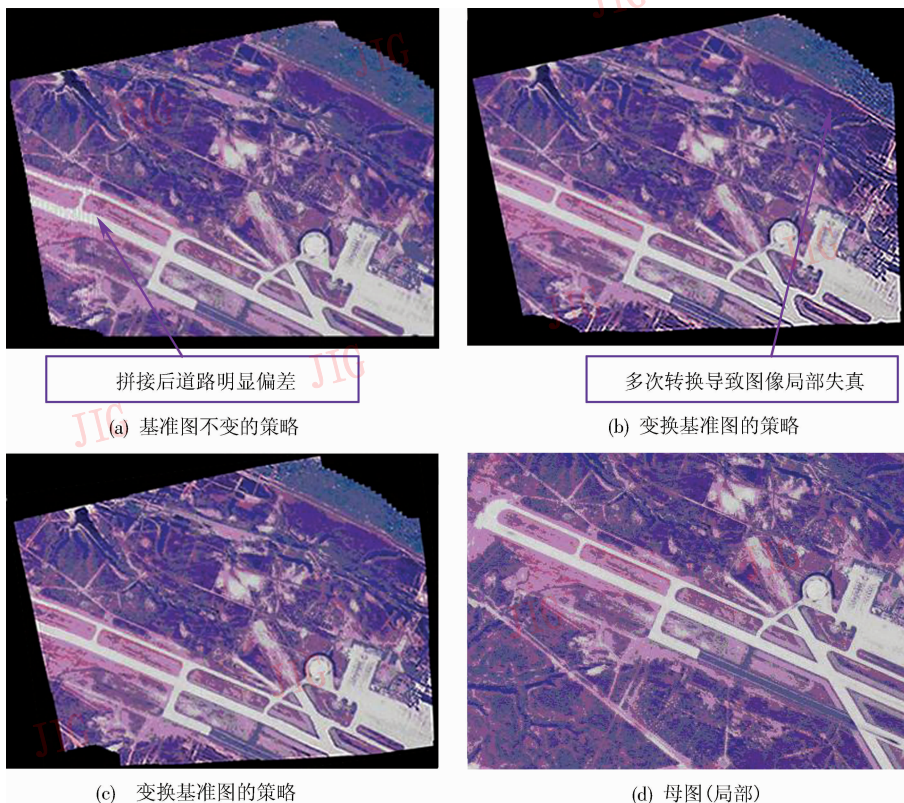


图 7 连续 20 帧仿真图按两种不同拼接策略的结果图

Fig. 7 The stitching result of 20 frames simulator images by two different way

由于拼接过程对实时性要求较高,所以拼接速度也是一个重要指标。图像处理程序是强依赖于图像的,图像的场景简单,则提取的特征少,处理时间就短;图像的场景复杂,则提取的特征多,处理时间将增加。故系统的速度不能只用一个时间衡量,用软件对二个不同的图像序列求拼接的平均时间,以说明系统运行速度。待拼接图像均为为 320×240 的 24 位彩色图像。实验过程中计算机的配置为 PIV2.0G, 256M 内存, Windows2000 Server 操作系统。一次拼接的平均时间如表 1 所示。与算法 2 平均时间相比,算法 1 由于进行了精匹配和基准图策略变换拼接速度有所下降,但同时得到了较高精度的拼接结果,计算结果表明,算法 1 仍然能够满足战技指标要求。

表 1 算法运行时间比较

单位:s

一次拼接的平均时间	实拍图序列	机场仿真序列
算法 2	0.74	0.85
算法 1	1.24	3.29

实验表明动态变换基准图的策略有效避免了连续拼接中误差的累积,但同时也带来了计算量增加的代价,在实际的工程应用中可根据拼接图像的质量和运算量加以综合选择;该策略也为类似高相关性、高重叠性、帧间多变的弹载多帧图像配准或拼接提供技术参考。

参考文献 (References)

1 Li Cong-li, Han Yu-sheng, Leng Xiao-yan, *et al.* Elimination of pseudo matching in image stitching[J]. Computer Applications and Software, 2006, **23**(11):93~95. [李从利, 韩裕生, 冷晓艳等. 序列图像拼接过程中误匹配的消除[J]. 计算机应用与软件, 2006, **23**(11):

93~95.]

- 2 Ding Ying, Hong Ji-guang. Distinguishing and solving of pseudo match in image mosaicing[J]. Journal of Image and Graphics, 1999, **4**(10): 886~890. [丁迎, 洪继光. 图象拼接中伪匹配的判别和消解[J]. 中国图象图形学报, 1999, **4**(10): 886~890.]
- 3 Leng Xiao-yan, Xue Mo-gen, Han Yu-sheng, *et al.* Sequence image stitching based on area feature and cross correlation[J]. Infrared and Laser Engineering, 2005, **34**(5):602~605. [冷晓艳, 薛模根, 韩裕生等. 基于区域特征与灰度交叉相关的序列图像拼接[J]. 红外与激光工程, 2005, **34**(5):602~605.]
- 4 Ren Hai-ping. The Research of Medical Image Register and Pattern Recognition [D]. Peking: Union Medical College, 2002. [任海萍. 医学图像配准和模式识别研究[D]. 北京: 中国协和医科大学, 2002.]
- 5 Wang Dong-feng, Zou Mou-yan. Automatic registration of multi-modal images based on the maximization of the alignment metric[J]. Journal of Electronics and Information Technology, 2003, **25**(6):755~762. [王东峰, 邹谋炎. 基于最大化对齐度的多模态图像自动配准[J]. 电子与信息学报, 2003, **25**(6):755~762.]
- 6 Xue Mo-gen, Han Yu-sheng, Li Cong-li, *et al.* A new sequential frame image registration based on area homonymy matrix[J]. Journal of Image and Graphics, 2006, **11**(1):53~59. [薛模根, 韩裕生, 李从利等. 基于区域同名度矩阵的连续帧图像配准[J]. 中国图象图形学报, 2006, **11**(1):53~59.]
- 7 Tang Jin, Gu Shi-wen, Cai Zhi-xing. The oretical analysis on image stitching error[J]. Mini-micro Systems, 2003, **24**(12), 2185~2189. [唐瑾, 谷士文, 蔡自兴. 图像拼接误差的理论分析[J]. 小型微型计算机系统, 2003, **24**(12), 2185~2189.]
- 8 Wang Wu-yi, Xu Ding-jie, Chen Jian-yi. Error Elements and Data Processing[M]. Harbin: Institute of Technology Press, 2001:17~18. [王武义, 徐定洁, 陈健翼著. 误差原理与数据处理[M]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学出版社, 2001:17~18.]
- 9 Song Qing. The Error and Data Evaluation in Ration Analysis[M]. Beijing: People's Education Press, 1982:58~61. [宋清著. 定量分析中的误差和数据评价[M]. 北京: 人民教育出版社, 1982:58~61.]