

基于线特征的影像与矢量的匹配

林 怡^{1,2}, 张绍明^{1,2}, 陈映鹰¹

(1. 同济大学 遥感与空间信息技术研究中心, 上海 200092; 2. 同济大学 测量与国土信息工程系, 上海 200092)

摘要: 为了保证影像线特征提取的结果与矢量数据的一致性, 提出了基于对称小波断面检测法和基于最大类间方差(OTSU)分割的形态算子检测算法。对称小波断面检测法主要用于提取影像中地物的边缘线; 基于 OTSU 分割的形态算子检测法主要用于提取影像中地物的中心线, 为影像与矢量匹配提供基础。同时, 针对地理信息系统(GIS)矢量数据极适合用线矩来描述的特点, 研究了 3 个参数匹配的方法, 这一方法中 3 个参数具有旋转不变性, 能够得到可靠的匹配结果。

关键词: 图像线特征; 边缘提取; 图像分割; 旋转不变矩; 参数匹配

中图分类号: TP 391.41

文献标识码: A

Line Feature-based Matching Between Imagery and Vector Map

LIN Yi^{1,2}, ZHANG Shaoming^{1,2}, CHEN Yingying¹

(1. Research Center of Remote Sensing and Spatial Information Technology, Tongji University, Shanghai 200092, China; 2. Department of Surveying and Geoinformatics, Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract: By matching the image to vector map, the vector data is the reference. Thereinto, some vectors of ground object are edge line and others are center line. It is necessary to keep the consistency between the result of image line-feature extraction and vector data. Here two kinds of detection algorithm are put forward. The first one is based on symmetric wavelet and applied to extracting the edge line in the image. The second one aims at detecting the center line of the ground object from image through OTSU segment and morphologic processing, which are the basis of matching between imagery and vector map. Since the line moment is suitable for expressing vector data, a study is made of one matching method with three rotation-invariant moment parameters. This method brings more effective and better matching

results.

Key words: image line-feature; edge detection; image segment; rotation-invariant moment; parameters matching

在影像变化检测的各种应用中, 利用已有的地理信息系统(GIS)信息是一个很好的途径, GIS 数据能够对遥感影像的配准和纠正提供控制数据, 使得影像的配准与纠正能够快速、高效地完成, 其关键问题是控制点的选择。一般来说, 控制点的选择是通过矢量与影像匹配的方法来完成的, 然而矢量与影像是 2 种不同类型的数字信息, 两者的匹配面临诸多困难, 这主要是由于影像边缘特征与矢量信息的不一致性造成的: ①矢量信息是经过编辑、综合、取舍而形成的规格化的点、线、面数据, 而影像是灰度连续的全要素信息, 经过特征提取所得到的边缘对于矢量信息来说存在很大的冗余, 这种不一致性给匹配带来了困难。②GIS 的部分地物图层(主要公路、大面积水体等)是以边缘线表达的(双线), 而有些地物图层(如道路、支线河流等)一般是以中心线表达的, 在提取特征与匹配时, 同时顾及 2 种情况也是一个难题, 这在影像特征提取时需要分别处理。

针对上述难点, 笔者主要对基于线状特征的矢量与影像匹配方法进行了研究, 提出了基于对称小波断面检测法和基于最大类间方差(OTSU)分割的形态算子检测法进行线特征提取。基于对称小波(anti-symmetrical wavelet, ASWlet)断面检测法主要用于双线地物的影像特征提取; 基于 OTSU 分割的形态算子检测法主要用于解决中心线地物的影像特征提取问题。为了解决影像与矢量的匹配问题, 根据 GIS 矢量数据极具规则性、适合用线矩描述的特点, 讨论了线矩的描述, 构成了 3 个旋转与尺度不变量

收稿日期: 2009-01-12

基金项目: “十一五”国家科技支撑计划资助项目(2006BAJ09B01)

作者简介: 林 怡(1970—), 女, 副研究员, 工学博士, 主要研究方向为遥感图像处理、数字摄影测量、计算机视觉与遥感技术应用等。

E-mail: Linyi@tongji.edu.cn

作为匹配基元,提出了三参数线矩不变量的匹配的方法,能够得到可靠的匹配结果.

1 基于对称小波的断面检测法影像线特征提取

矢量图层中的线状目标大体可分为2类表达方式:双线方式和单线方式.双线方式一般表达的是目标的边缘信息,如河岸、海岸线和公路边沿等.而单线方式则用来表达目标的中心线信息,如河流中心线、道路中心线等.要充分利用这2类矢量数据,必须对影像采用不同的特征提取方式以取得图像特征和矢量信息的最大程度的一致性,才能进行有效匹配,为此,首先来讨论基于反对称小波的断面检测法,以便提取影像边缘信息.

文献[1]详细讨论了利用对称小波多尺度提取边缘信息的问题,并提出一种多尺度小波滤波器^[1]

$$\left. \begin{aligned} h(s, x)_k &= \frac{1}{2\pi} \int_{-\pi}^{\pi} e^{(-\frac{3s^2\sigma^2\omega^2}{2})} e^{ik\omega} d\omega \\ g(s, x)_k &= \sqrt{\frac{2}{\pi}} \int_{-\pi}^{\pi} i\omega e^{(-\frac{3s^2\sigma^2\omega^2}{2})} e^{ik\omega} d\omega \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

式中: h 为小波低通滤波器; s 为频率; x 为时间; k 为尺度参量; σ 为高斯函数标准差; ω 为角频率; g 为小波高通滤波器.由式(1)可知,该小波函数低通滤波器关于原点对称,高通滤波器关于原点反对称,因此称其为对称小波(symmetrical wavelet, SWlet).SWlet小波的对称性对于影像特征提取显得极其重要,这是因为对称滤波器具有线性相位,在影像的多尺度重建与特征提取中能够减小边缘的失真^[2].

式(1)中元素与文献[1]定义相同.按照式(1),分别取不同的尺度系数,可以得到多尺度低通与高通滤波器的响应系数分别为 H, G , 表示为^[1]

$$\left. \begin{aligned} H &= H_c = H_r = \{h_5 \ h_4 \ h_3 \ h_2 \ h_1 \ h_0 \ h_1 \ h_2 \ h_3 \ h_4 \ h_5\} \\ G &= G_c = G_r = \{-g_5 \ -g_4 \ -g_3 \ -g_2 \ -g_1 \ g_0 \ g_1 \ g_2 \ g_3 \ g_4 \ g_5\} \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

式中:下标 c, r 分别为影像的行、列数; $h_5, h_4, \dots, g_4, g_5$ 为小波滤波器响应系数.用该小波滤波器对影像 f 进行分解与重建,即可构成多尺度影像进行边缘提取^[3]

$$\left. \begin{aligned} f_{l+1} &= H_c H_r f_l \\ d_{l+1,h} &= G_c H_r f_l \\ d_{l+1,v} &= H_c G_r f_l \\ d_{l+1,a} &= G_c G_r f_l \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

式中: f 为影像函数; l 为尺度参数; d 为滤波器响应; h 表示水平分量; v 表示竖直分量; a 表示对角线分量. SWlet 小波本身不仅具有对称性,而且具有很好的平滑性,能够直接选择不同尺度的高通滤波器,既能较好地抑制噪声,又能在特征的垂直方向找到变化的极大值处,实现边缘特征的准确定位.

利用对称小波检测出影像的高频信息后,就可以根据方向断面实现边缘检测.

根据小波理论,对一个影像函数 $f(x, y)$ 来说,序列函数 W_f 是它的多尺度描述, $\psi_{1,2^l}(x, y)$ 和 $\psi_{2,2^l}(x, y)$ 分别是 $f(x, y)$ 的水平方向和垂直方向的特征,即式(3)中的 $d_{l+1,h}$ 和 $d_{l+1,v}$. 因此可得影像特征点梯度的幅值 M_{2^l} (强度)与幅角 A_{2^l} 的表达式^[4]

$$\left. \begin{aligned} M_{2^l} f(x, y) &= \sqrt{|d_{l,h}|^2 + |d_{l,v}|^2} \\ A_{2^l} f(x, y) &= \arctan(d_{l,v}/d_{l,h}) \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

一般来说,影像的边缘特征是梯度值局部最大处,因此,梯度图可以作为特征检测的基本依据.而常用的方法是用检测算子对图像进行卷积以后,通过 x 和 y 方向提取零交叉(LOG算子)^[5]或者通过函数拟合从2个方向提取最大梯度来获得边缘.实际上,特征梯度局部最大值是在边缘矢量的法线处,常用的零交叉或拟合很难得到可靠的结果.而根据式(4)小波变换的结果即可建立小波系数梯度图(g -map)和方向图(d -map)^[4]. g -map 纪录每一个像素的梯度模值; d -map 纪录每一个像素梯度模的方向,在每一个像素点上,沿着 d -map 值最大的方向,即可在相邻像素序列求得梯度模的极大值,从而完成影像边缘特征提取.

在完成了边缘检测之后,还需要对边缘细化,得到仅具有1个像素宽度的边缘特征,以便于用线特征参数描述和匹配.根据同一曲线上相邻的点具有最相近的法线方向的原理,在跟踪过程中,利用 d -map 图,搜索具有最接近的梯度方向的点,剔除多余点,达到细化的目的.因此, d -map 图又成为边缘跟踪的依据^[4].

图1是基于对称小波的断面检测法影像线特征提取的框图.

图2给出了基于对称小波的断面检测法对高分辨率遥感影像进行线特征提取的结果.其中图2c是直接提取的边缘线特征,包含了影像的全要素,而矢量信息是完全约简的边界信息,为了尽可能与矢量信息保持一致,对提取的结果进行了直方图滤波^[6].图2d是滤波的结果,显然,经过滤波后的边缘线与

矢量信息更加接近,这无疑对于匹配是很有利的。

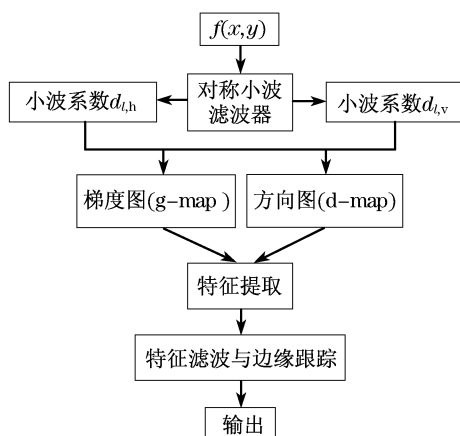


图1 基于对称小波的断面检测法影像线特征提取框图

Fig.1 Flow chart of image line feature extraction based on symmetric wavelet profile edge detection

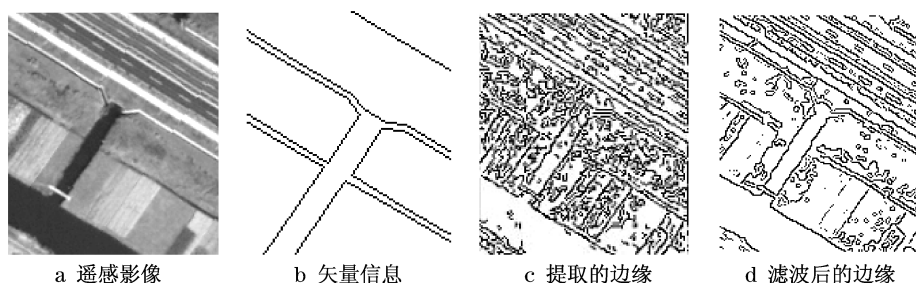


图2 基于对称小波的断面检测法影像线特征提取结果

Fig.2 Result of image line feature extraction based on symmetric wavelet profile edge detection

最大类间方差法的基本思想是利用图像的灰度直方图,以目标和背景的方差最大来动态地确定图像的分割阈值.其基本原理如下^[7]:现设 $f(x, y)$ 为 $M \times N$ 的图像, $f(x, y)$ 为图像灰度函数,图像宽度为 M ,高度为 N ,其灰度级为 L ,其直方图为 $p(i)$, $i = 1, 2, \dots, L-1$,设图像分为高灰度(U)和低灰度(V)2个部分,分割阈值为 T ,则有: U 组影像灰度概率 $P_U = \sum_{i=0}^T p(i)$, V 组影像灰度概率 $P_V = \sum_{i=T+1}^{L-1} p(i)$, U 组影像灰度均值 $M_U = \frac{1}{P_U} \sum_{i=0}^T i p(i)$, V 组影像灰度均值 $M_V = \frac{1}{P_V} \sum_{i=T+1}^{L-1} i p(i)$,总均值 $M = P_U M_U + P_V M_V$.

图像最佳阈值 D_{UV} 为使式(5)达到最大时的取值,即

$$D_{UV} = \max[P_U(M_U - M)^2 + P_V(M_V - M)^2] \quad (5)$$

式(5)为2类灰度的类间方差,在目标和背景的临界处,灰度的变化大,这时的灰度值为最佳阈值,最佳

2 基于最大类间方差分割和数学形态学的中心线提取

由图2的结果可以看出,基于对称小波的断面检测法有很好的边缘特征提取的性能,对于道路或其他双线目标的提取是十分有效的,但是对于单线描述的目标,该方法提取的特征与矢量信息具有不一致性,不能用来进行匹配,因此要研究单线数据的中心线提取方法。

为了选取控制点而进行的匹配大多在小窗口内进行,并且河流等目标的灰度大多与背景有较大差别,为此笔者研究了基于最大类间方差理论的匹配窗口内目标分割方法,然后用形态学方法提取影像特征的中心线。

阈值通过迭代方式自动获取^[6]。

利用最大类间方差方法能够在图像局部对道路、河流等明显线特征进行提取.图3给出了高分辨率遥感影像的最大类间方差分割的结果。

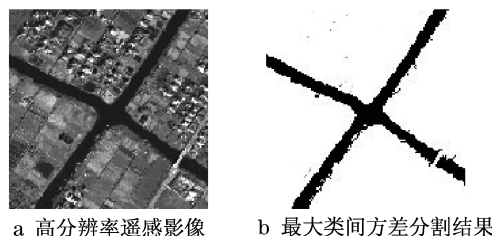


图3 遥感影像最大类间方差分割结果

Fig.3 Result of maximum between cluster variance segmentation for remote sensing images

由图3可以看到,OTSU方法可有效地将图中目标进行分割,获取兴趣目标。

分割后的图像要进一步确定目标的中心线才能够参与匹配.笔者研究了基于数学形态学的二值图像细化方法.该算法可以描述为图像骨架的抽取过

程,即重复去除二值图像的边界像素,并保持目标的连通性,从而最终使目标成为单像素的图像骨架。

首先,针对提取中心线的需要,给出一些运算的定义^[8].设二值图像为 A ,结构元素集合为 B , x 表示集合 A 的平移距离.腐蚀运算定义为

$$A \ominus B = \{x: B + x \leq A\} \quad (6)$$

A 被 B 腐蚀的结果集合是 B 完全包括在 A 中时 B 的原点位置的集合。

膨胀运算定义为

$$A \oplus B = [A^c \ominus (\hat{B})]^c \quad (7)$$

式中: C 代表补集; \hat{B} 为 B 关于原点的映射.用 B 来膨胀 A 得到的集合是 \hat{B} 的位移与 A 至少有 1 个非零元素相交时 B 的原点位置的集合。

开运算定义为

$$A \circ B = (A \ominus B) \oplus B \quad (8)$$

闭运算定义为

$$A \bullet B = (A \oplus B) \ominus B \quad (9)$$

击中击不中变换是建立在腐蚀运算基础上的,它在一次运算中同时可以捕获到内外标记.击中击不中变换需要 2 个结构基元 E 和 F ,这 2 个基元被作为 1 个结构对 $B_i = (E, F)$,一个用于探测图像内部,另一个用于探测图像外部.击中击不中变换定义为

$$A * B = (A \ominus E) \cap (A^c \ominus F) \quad (10)$$

形态学细化依赖于击中击不中变换.对于结构对 $B = (E, F)$,利用 B 细化 S 定义为

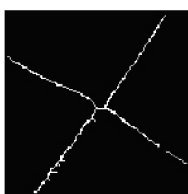
$$S \otimes B = S - (S * B) \quad (11)$$

即 S 的细化结果为 $S * B$ 与 S 的差集。

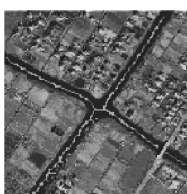
如果定义 1 个结构元素对序列为 $\{B\} = \{B_1, B_2, \dots, B_n\}$,其中 B_{i+1} 代表 B_i 旋转的效果,则细化也可以定义为

$$S \otimes B = (\dots((S \otimes B_1) \otimes B_2) \dots) \otimes B_n \quad (12)$$

图 4a 给出了用图 3 的分割图像经过形态变换处理后的特征中心线.图 4b 是中心线与图像叠加的结果.由图可以看到,该方法能够较好地提取目标的中心线,这为进一步的矢量描述以及中心线匹配提供了基础。



a 细化中心线



b 中心线与原始图像的叠加

图 4 图像细化结果

Fig.4 Result of image thinning

3 矢量与影像匹配算法

对于影像中心线与矢量匹配,采用基于线矩不变量的匹配算法.对于双线边缘特征,采用基于相关系数信噪比的匹配算法.这里主要讨论基于线矩不变量的匹配算法。

根据线积分原理,可以写出曲线的 2 阶中心矩^[6],这里为解算的需要,仅写出 $(1,1)$, $(2,0)$ 和 $(0,2)$ 阶中心矩 $\mu_{1,1}$, $\mu_{2,0}$ 和 $\mu_{0,2}$

$$\left. \begin{aligned} \mu_{1,1} &= \sum_{i=1}^n \Delta l_i \left((x'_{i-1} + \Delta x_i) \left(y'_{i-1} + \frac{1}{2} \Delta y_i \right) - \Delta x_i \left(\frac{1}{2} y'_{i-1} + \frac{1}{6} \Delta y_i \right) \right) \\ \mu_{2,0} &= \sum_{i=1}^n \Delta l_i \left((x'_{i-1} + \Delta x_i) x'_{i-1} + \frac{1}{3} \Delta x_i^2 \right) \\ \mu_{0,2} &= \sum_{i=1}^n \Delta l_i \left((y'_{i-1} + \Delta y_i) y'_{i-1} + \frac{1}{3} \Delta y_i^2 \right) \end{aligned} \right\} \quad (13)$$

式中: Δl_i 为距离.曲线的 (p, q) 阶尺度不变矩 $\eta_{p,q}$ 为

$$\eta_{p,q} = \frac{\mu_{p,q}}{l^{p+q+1}} \quad (14)$$

式中: $\mu_{p,q}$ 为曲线的 (p, q) 阶中心矩.于是可以组成尺度与旋转不变矩参数作为匹配基元。

$$\left. \begin{aligned} \varphi_2 &= (\eta_{20} - \eta_{02})^2 + 4\eta_{11}^2 \\ \varphi_{\max} &= \frac{\varphi_1}{2} + \frac{\sqrt{\varphi_2}}{2} \\ \varphi_{\min} &= \frac{\varphi_1}{2} - \frac{\sqrt{\varphi_2}}{2} \end{aligned} \right\} \quad (15)$$

式中: φ_2, φ_1 为不变矩; φ_{\max} 为最大矩; φ_{\min} 为最小矩.各元素定义与文献^[7]相同,只是文献中不变矩 φ_1 与 φ_2 具有关联性,由于 φ_1 的计算结果具有较强的不稳定性,这里舍去了 φ_1 ^[8]。

在对图像进行了边缘提取、跟踪细化、链码与线矩描述后,可以得到每一组影像特征中心线与 GIS 矢量信息对应的、式(14)所表达的特征参数,在这个基础上,利用矢量空间距离总和和最小的准则进行匹配

$$\sum_{k=1}^n D_k(i, j) < \min \quad (16)$$

其中

$$\left. \begin{aligned} D_1(i, j) &= \frac{|\varphi_{b,2}(i) - \varphi_{r,2}(j)|}{|\varphi_{b,2}(i) + \varphi_{r,2}(j)|} \\ D_2(i, j) &= \frac{|\varphi_{b,\max}(i) - \varphi_{r,\max}(j)|}{|\varphi_{b,\max}(i) + \varphi_{r,\max}(j)|} \\ D_3(i, j) &= \frac{|\varphi_{b,\min}(i) - \varphi_{r,\min}(j)|}{|\varphi_{b,\min}(i) + \varphi_{r,\min}(j)|} \end{aligned} \right\} \quad (17)$$

式中: i, j 分别表示基准图第 i 条边缘和匹配图第 j 条边缘; b, r 分别表示矢量数据(基准图)和图像线特征(匹配图)。很显然, 当实现了正确匹配时, D_k 应为零, 实际上, 由于噪声以及不一致性影响, D_k 不可能为零, 按式(15)取空间距离总和最小边缘匹配的准则即可。

对于双线边缘特征, 本文中采用基于相关系数信噪比的匹配算法, 可参见文献[8]。

4 实验结果与结论

实验利用高分辨率航空影像与矢量信息进行匹配, 图像大小为 $4096 \text{ 像素} \times 4096 \text{ 像素}$ 。图5给出了对于具有地物边缘信息的矢量采用基于对称小波的断面检测法得到的边缘信息进行匹配的例子, 是对图2b和图2d进行匹配。

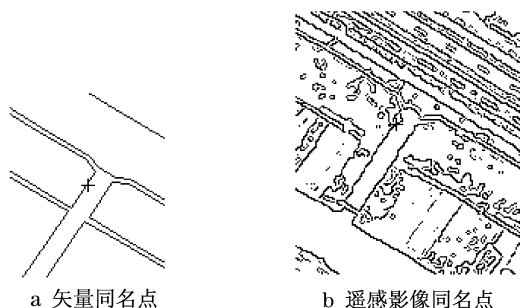


图5 基于信噪比的匹配结果

Fig.5 Matching results based on noise-signal ratio

对于具有地物中心线信息的矢量采用基于分割与形态学得到的中心线信息进行线矩匹配, 图6给出了匹配例子。

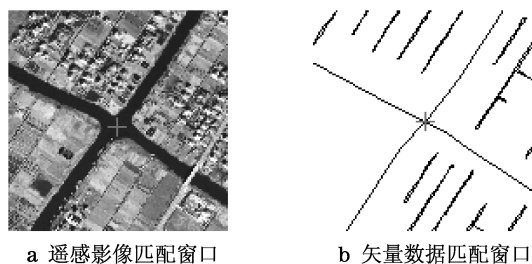


图6 基于线矩的匹配结果

Fig.6 Matching results based on line moment

图7给出了整幅影像与矢量信息的匹配结果(截取部分)。图7a为遥感影像匹配窗口图像, 图7b为相应的矢量数据。利用手工选定的相应同名点进行检验, x 方向和 y 方向的匹配误差均小于1个像素。

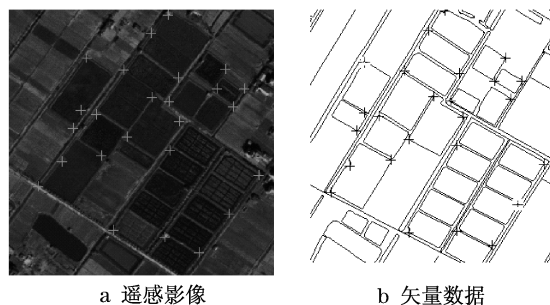


图7 影像与矢量的匹配结果

Fig.7 Results of matching between imagery and vector map

根据上述讨论与实验可以得出如下结论:

采用对称小波滤波器并用断面检测法提取影像边缘, 能够较好地表达地物的边缘, 经过滤波处理与双线特征的矢量信息可以达到较好的一致性, 利用基于信噪比的相关算法即可得到很好的匹配效果。

为了解决影像中心线的提取问题, 利用最大类间方差与数学形态学相结合的方法是有效的, 能够适合于矢量中心线数据匹配的需要。

由于提取的中心线信息与矢量信息之间具有较好的一致性, 很适合于用线矩进行描述, 而且应用3个具有尺度与旋转不变的参量匹配能够得到可靠的结果。

参考文献:

- [1] 林怡, 陈鹰. 一种小波滤波器的构造与多尺度边缘检测[J]. 计算机工程与应用, 2004, 40(35): 22.
LIN Yi, CHEN Ying. The construction of a wavelet filter and multiscale edge detection [J]. Computer Engineering and Applications, 2004, 40(35): 22.
- [2] 冉启文. 小波分析方法及其应用[M]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学出版社, 1995.
RAN Qiwen. Wavelet analysis method and its application [M]. Harbin: Harbin Institute of Technology Press, 1995.
- [3] 陈鹰, 林怡. 基于提升小波的影像变换与匹配[J]. 测绘学报, 2006, 35(1): 19.
CHEN Ying, LIN Yi. Image matching and translation base on lifting scheme wavelet [J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2006, 35(1): 19.
- [4] 林怡, 陈鹰. 一种线性提升小波的方向断面边缘检测法[J]. 同济大学学报: 自然科学版, 2007, 35(12): 1699.
LIN Yi, CHEN Ying. A direction profile detection algorithm for

- edge extraction with a linear lifting scheme wavelet [J]. *Journal of Tongji University: Natural Science*, 2007, 35(12): 1699.
- [5] Gonzalez Rafael C, Woods Richard E. 数字图像处理[M]. 北京: 电子工业出版社, 2003.
- Gonzalez Rafael C, Woods Richard E. Digital image processing [M]. Beijing: Electronic Industry Press, 2003.
- [6] 陈鹰. 遥感影像的数字摄影测量[M]. 上海: 同济大学出版社, 2004.
- CHEN Ying. Digital photogrammetry for remote sensing image [M]. Shanghai: Tongji University Press, 2004.
- [7] 林怡, 陈鹰. 用立体影像匹配和数学形态变换自动生成 DEM [J]. *中国图象图形学报*, 2003, 8(4): 447.
- LIN Yi, CHEN Ying. Auto-generating DEM with stereo image matching and mathematical morphologic transformation [J]. *Journal of Image and Graphics*, 2003, 8(4): 447.
- [8] 张剑清, 朱丽娜, 潘励. 基于遥感影像和矢量数据的水系变化检测[J]. *武汉大学学报: 信息科学版*, 2007, 32(8): 663.
- ZHANG Jianqing, ZHU Lina, PAN Li. River change detection based on remote sensing imagery and vector data[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2007, 32(8): 663.

(上接第 597 页)

4 结语

研究了当摄像机绕光心旋转时的图像的重投影, 并探讨了基于图像重投影技术的极线校正方法. 该方法的特点是先采用 2.3 节描述的图像重投影技术将 2 幅图像重投影到平行的平面, 再作校正. 实验表明本文的极线校正方法正确有效, 并且图像的扭曲也比较小. 下一步工作是将该方法与其他极线校正方法做进一步的对比实验.

参考文献:

- [1] Oh Kyoungsu, Kim Hyowon, Lee Chulhan, et al. Real-time rendering of multi-view images from a single image with depth [C] // *Proceedings of the 5th International Conference on Computational Science and Applications*. Kuala Lumpur: IEEE Computer Society, 2007, 505 - 509.
- [2] Seitz S M, Dyer C R. View morphing[C] // *Proc of Siggraph96*. ACM SIGGRAPH. New York: Addison Wesley, 1996, 21 - 30.
- [3] 于洪川, 吴福朝, 阮宗才, 等. VR 环境图像生成中几项关键技术研究[J]. *计算机研究与发展*, 1999, 36(11): 1349.
- YU Hongchuan, WU Fuchao, RUAN Zongcai, et al. The study of several key techniques in building VR visual field [J]. *Journal of Computer Research & Development*, 1999, 36(11): 1349.
- [4] LIU Zhanwei, AN Ping, LIU Suxing, et al. Arbitrary view generation based on DIBR [C] // *Proceedings of 2007 International Symposium on Intelligent Signal Processing and Communication Systems*. Xiamen: IEEE Circuits and Systems Society, 2007, 168 - 171.
- [5] 于洪川. 视觉基础矩阵的算法及其应用研究[D]. 合肥: 中国科学院等离子体物理研究所, 2000.
- YU Hongchuan. Research on algorithms of fundamental matrix and applications [D]. Hefei: Institute of Plasma Physics, CAS, 2000.
- [6] Fusiello A, Trucco E, Verri A. A compact algorithm for rectification of stereo pairs [J]. *Machine Vision and Applications*, 2000, 12(1): 16.
- [7] 李秀智, 张广军. 三目视觉图像的极线校正方法[J]. *光电工程*, 2007, 34(10): 50.
- LI Xiuzhi, ZHANG Guangjun. Epipolar rectification in trinocular vision images [J]. *Opto-electronic Engineering*, 2007, 34(10): 50.
- [8] Seitz S M. Image-based transformation of viewpoint and scene appearance[D]. Madison: University of Wisconsin. Department of Computer Sciences, 1997.
- [9] 林国余, 张为公. 一种无需基础矩阵的鲁棒性极线校正算法[J]. *中国图象图形学报*, 2006, 11(2): 203.
- LIN Guoyu, ZHANG Weigong. An effective robust rectification method for stereo vision[J]. *Journal of Image and Graphics*, 2006, 11(2): 203.
- [10] Francesco Isgro, Emanuele Trucco. Projective rectification without epipolar geometry [C] // *IEEE International Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*. Fort Collins: IEEE Computer Society, 1999, 94 - 99.
- [11] Loop C, Zhang Zhengyou. Computing rectifying homographies for stereo vision[C] // *Proc of IEEE Conf on Computer Vision and Pattern Recognition*. Fort Collins: IEEE Computer Society, 1999, 125 - 131.
- [12] Mallon J, Whelan P F. Projective rectification from the fundamental matrix[J]. *Image and Vision Computing*, 2005, 23(7): 643.