勿需图像矫正的高精度窄基线三维重建算法

刘怡光[1]，赵晨晖[1]，黄蓉刚[1]，第宝峰[2]

(1. 四川大学计算机学院　成都　610065；2. 四川大学建筑与环境学院　成都　610065)

【摘要】精确可信三维重建受图像配准与矫正误差严重影响，为此，提出一种勿需矫正的高精度窄基线三维重建算法。先结合相位相关与曲线拟合原理获得高精度亚象元视差：对两幅图像傅里叶变换的归一化交叉能量谱进行傅里叶逆变换得到一峰值明显的矩阵，用高斯函数对峰值附近数据进行曲线拟合计算配准关系；再将视差累加并进行单位化寻找基线在成像面上的投影(主方向)；最后把视差在主方向投影，根据像点深度与该投影成正比例，进行场景三维欧氏重建。无矫正误差与高高精度视差计算使重建结果精确可信，对多类场景进行实验，证明该方法有优良的效果。

关　键　词　三维重建;　图像配准;　窄基线;　相位相关;　亚象元

中图分类号　TP317.4　　文献标志码　A　　doi:10.3969/j.issn.1001-0548.2014.02.020

Rectification-Free 3-Dimensional Reconstruction Method based on Phase Correlation for Narrow Baseline Image Pairs

LIU Yi-guang[1], ZHAO Chen-hui[1], HUANG Rong-gang[1], and DI Bao-feng[2]

(1. College of Computer Science, Sichuan University　Chengdu　610065;

2. College of Architecture and Environment, Sichuan University　Chengdu　610065)

Abstract　The credibility and precision of 3D reconstruction are sensitive to registration errors and rectification errors. To tackle this problem, we propose a high precision rectification-free narrow base-line 3D reconstruction algorithm. The high accuracy parallax is acquired by combining the phase-correlation and curve fitting method. A peak obvious matrix is obtained by inverse Fourier transform of normalized cross-power spectrum which is generated from Fourier transformations of two images. Measurements of disparity at sub-pixel level is obtained by curve fitting data near that peak. The base-line's projection on the imaging plane (called main-direction for short) is found by computing and normalizing the sum of all points' parallaxes. The 3D Euclidean reconstruction is obtained by projecting all points' parallaxes onto the main-direction because the depth value of each point is proportional to its projection. A large number of experiments on all kinds of scenes prove that the proposed algorithm can attain excellent reconstruction performance for stereo images with narrow baseline.

Key words　3D reconstruction;　image registration;　narrow baseline;　phase correlation;　sub-pixel

三维重建广泛应用于地质勘探，地球测量，数字娱乐，医疗卫生等领域，已有大量研究[1-7]。近年来国内也有一些相关研究[8-9]。

现有重建技术多建立在图像矫正的基础上，矫正技术带来的误差，尤其是错误矫正严重影响重建结果的可信性与精确度。同时，受配准技术精度的限制，多数研究都是针对宽基线情况或只在基线较宽时才有良好的重建效果。与宽基线距相比，窄基线具有如下优点：首先荫蔽效应弱，能够更好地恢复表面特征[1-10]；其次窄基线立体像对容易获取，在同一载具上搭载两台摄像机同时拍摄一段视频序列的两帧都是良好的窄基线像对。但是窄基线距立体像对视差小，多数图像配准技术只能精确到整像素级别，不足以计算微小的视差，成为窄基线重建主要障碍。为此，本文提出了一种勿需矫正的窄基线三维重建算法，用结合相位相关和曲线拟合技术的图像配准技术计算高精度视差，再使用视差寻找基线(即摄像机连线)在成像面上的投影(主方向)，最后把各点视差向主方向投影，根据投影与深度的正比例关系进行三维欧氏重建。

相位相关是建立在傅里叶平移理论上的区域相关图像配准算法[11]，最早由文献[12]提出，通过傅

收稿日期：2012－10－24；修回日期：2013－10－14

基金项目：国家自然科学基金(61173182, 61179071); 四川省科技基金(2012HH0004, 2011JY0124, 2012HH0031, 2012GZ0095); 四川省创新苗子工程(201212，201205)

作者简介：刘怡光(1972－)，男，教授，主要从事计算机图形图像处理、视觉计算、智能系统等方面的研究.

里叶变换将图片信息转换到频率域计算配准关系，减轻了亮度色调对配准的影响，具有峰值明显鲁棒性强的优势。其后文献[13-14]先后将其拓展到亚象元精度，这些方法均没有考虑干扰源对配准的影响，文献[1]使用一种SVD相位相关匹配算法，具有较高的精度但同样存在计算量大的问题。本文算法在不提高传统整像素相位相关配准算法计算复杂度的前提下，将计算精度提高到亚象元级别并且在仿真实验中误差保持在1/50像素左右，同时也表现出对噪声与亮度、色调变化不敏感的特征。

文献[4-7]介绍了根据视差与摄像机的内外参数进行三维重建，文献[2-3]阐述了窄基线三维重建的原理，并进行了实验验证。国内也进行了地表重建的研究[15]。文献[1]通过逐点计算以该点为中心的32×32的小窗的配准关系计算视差。在原有的窄基线重建理论基础上，本文提出了主方向的概念，将基线在成像面上的投影定义为主方向。通过小窗配准，计算每一点的视差，累加并进行单位化得到主方向。场景中任一点的深度与视差在主方向的投影成正比，通过计算每一点的深度信息实现整个场景的三维重建。无需矫正，避免了矫正引入的误差。

对多种类型，不同尺度的场景进行重建实验显示：本文方法对窄基线图片有较好的重建效果，特别是使用航拍图片进行地形重建方面实用性很强。

1　亚象元图像配准

窄基线三维重建算法的一大障碍是计算微小视差。窄基线立体像对视差较小，对计算精度提出了极高的要求。同时在实际应用中受到拍摄设备、时间不同等因素的影响，两幅图像的色调、亮度等属性都存在差异，图像内容也会有些变化。需要视差计算在具有高精确度的同时，又要有强鲁棒性，能够耐受色调、亮度的变化与一定程度的噪声。本文结合相位相关理论和曲线拟合思想，得到了一种精度高鲁棒性强的图像配准算法。

1.1　相位相关的基本原理

相位相关是一种建立在傅里叶平移理论上的配准技术。对于两个具有相同定义域的二元函数 $g_1(x,y)$ 与 $g_2(x,y)$，如果满足等式：

$$g_2(x,y)=g_1(x-\Delta x,y-\Delta y) \tag{1}$$

根据傅里叶平移理论，傅里叶变换像函数 G_1、G_2，存在如下关系：

$$G_2(u,v)=G_1(u,v)\exp\{-\mathrm{i}(u\Delta x+v\Delta y)\} \tag{2}$$

式中，i为虚数单位。计算 G_1 与 G_2 的归一化交叉能量谱得到：

$$\frac{G_2(u,v)\overline{G_1}(u,v)}{|G_2(u,v)\overline{G_1}(u,v)|}=\exp\{-\mathrm{i}(u\Delta x+v\Delta y)\} \tag{3}$$

式中，$\overline{G_1}$ 表示 G_1 的共轭。

对于数字图像，$(\Delta x,\Delta y)$ 就是图像间的位移关系。求解 $(\Delta x,\Delta y)$ 有两种基本原理：1) $u\Delta x+v\Delta y=0$ 是三维欧式空间中法向量为 $(\Delta x,\Delta y)$ 的平面；2) 通过求归一化交叉能量谱的傅里叶逆变换得到中心坐标为 $(\Delta x,\Delta y)$ 脉冲函数。

1.2　亚象元配准

1.2.1　原理

通过傅里叶逆变换法求解 $(\Delta x,\Delta y)$ 的原理是对两幅图像傅里叶变换后的归一化交叉能量谱进行傅里叶逆变换，是以 $(\Delta x,\Delta y)$ 为中心的冲激函数。由于数字图像是离散数据，计算交叉能量谱和傅里叶逆变换得到的也是离散数据(矩阵)。本文使用二维高斯函数对冲激函数进行曲线拟合，近似地认为高斯函数的中心就是 $(\Delta x,\Delta y)$。

根据高斯函数的性质，二维高斯函数在任一维上的积分是一维高斯函数，且这个一维高斯函数的中心是对应二维高斯函数中心点在这一维上的投影。如一个二维高斯函数 $H(x,y)$ 的中心点是 (a,b)，那么它关于x的积分 $H_x(y)=\int H(x,y)\mathrm{d}x$ 是一个中心为b的关于y的一维高斯函数。根据上述性质可以将一个二维拟合问题转换成两个一维拟合问题，分别计算水平和垂直方向的位移。

一维高斯函数的形式为：

$$H(x)=a\cdot\exp\left\{-\frac{(x-b)^2}{c^2}\right\} \tag{4}$$

式中，参数 b 是 $H(x)$ 的中心位置；c与a分别是水平和垂直方向的缩放系数。

假设 (u_{-1},v_{-1})、(u_0,v_0)、(u_1,v_1) 是3个待拟合的点，其中 u_{-1}、u_0、u_1 是3个连续的整数。代入式(4)得到方程组：

$$\begin{cases} a\cdot\exp\left\{-\dfrac{(u_{-1}-b)^2}{c^2}\right\}=v_{-1} \\ a\cdot\exp\left\{-\dfrac{(u_0-b)^2}{c^2}\right\}=v_0 \\ a\cdot\exp\left\{-\dfrac{(u_1-b)^2}{c^2}\right\}=v_1 \end{cases} \tag{5}$$

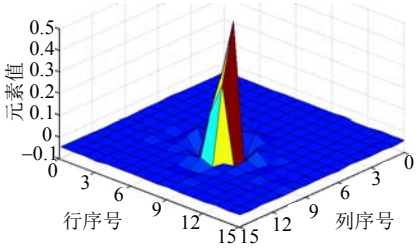
解得：

$$b=\frac{M(u_0+u_1)-(u_{-1}+u_0)}{2M-2} \tag{6}$$

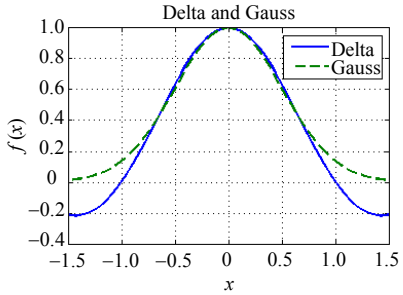
式中，

$$M=\frac{\ln v_0-\ln v_{-1}}{\ln v_1-\ln v_0}$$

通过式(6)可以使用3个连续点求解出一维高斯函数的中心点坐标b。冲激函数与高斯函数如图1所示。



a. 傅里叶逆变换后的数据



b. 一维高斯与冲激函数

图1 冲激函数与高斯函数

傅里叶逆变换结果矩阵实部有明显的峰值，除峰值及其周围的少部分数据点处，其余都趋近于0，如图1a所示取出峰值点及与其邻接的8个点，得到3×3矩阵$\boldsymbol{A}$，$A_{0,0}$为峰值点，在原矩阵中坐标为(x_0,y_0)，通过如下两个步骤解出$(\Delta x,\Delta y)$：

$$\boldsymbol{A}=\begin{bmatrix} A_{-1,-1} & A_{-1,0} & A_{-1,1} \\ A_{0,-1} & A_{0,0} & A_{0,1} \\ A_{1,-1} & A_{1,0} & A_{1,1} \end{bmatrix} \tag{7}$$

1) 对两个方向分别计算数值积分，得到两组有序数对：

$$\left\{(x_i,a_i)|i\in S \quad a_i=\sum_{j=-1}^{1}A_{ij},x_i=x_0+i\right\} \tag{8}$$

$$\left\{(y_i,b_i)|i\in S \quad b_i=\sum_{j=-1}^{1}A_{ji},y_i=y_0+i\right\} \tag{9}$$

式中，$S=\{-1,0,1\}$

2) 将两组数对代入式(6)，即可解出Δx与Δy。

1.2.2 算法

配准流程如图2所示。

首先对灰度化的图片进行二维傅里叶变换进而求出归一化的交叉能量谱，然后对能量谱进行傅里里叶逆变换得到逆变换矩阵，最后使用曲线拟合方法求得计算结果。归一化交叉能量谱的计算公式为：

$$S_{\text{output}}=\frac{G_2(u,v)\overline{G}_1(u,v)}{|G_2(u,v)\overline{G}_1(u,v)|} \tag{10}$$

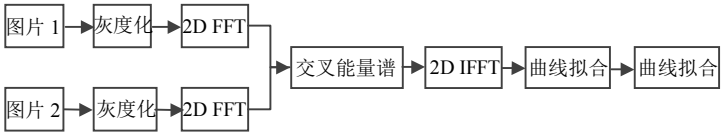
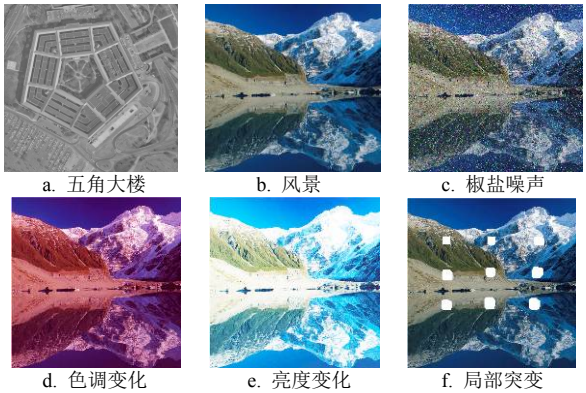


图2 亚象元配准流程图

1.2.3 特点

该方法有运算量小、精度高、鲁棒性强3个特点。本文方法只是在传统方法后追加了数值积分和对称中心的计算，两个计算过程的时间复杂度和空间复杂度均为$O(1)$，计算整体复杂度的数量级与传统相位相关方法相同。配准实验图片如图3所示。

计算精度高是该算法的主要优点。使用高斯函数可以在峰值附近较好的拟合冲激函数，在特定参数下两个函数非常接近，图1b是冲激函数与高斯函数在峰值附近的对比。图3a和图3b展示了两幅实验使用的原始图片，分辨率分别是512×512与1 200×1 200 (单位：像素)，表1展示对图3b进行不同人为位移的计算结果，可见该方法确实达到了亚象元精度，且计算误差在1/50象元左右。表2显示了本文方法与文献[13-14]中方法的对比，本文方法计算精度明显好于文献[13]，略好于文献[14]。



a. 五角大楼 b. 风景 c. 椒盐噪声

d. 色调变化 e. 亮度变化 f. 局部突变

图3 配准实验图片

表1　风景图片的配准计算结果

图片	真实值	计算值	误差
风景	(1/4,3/4)	(0.249 0, 0.742 6)	(0.004 4,0.016 2)
	(1/2,−1/2)	(0.489 4, −0.492 7)	(0.010 8,0.003 3)
	(13/6,10/6)	(2.187 1 , 1.683 1)	(0.0204,0.016 5)
	(1/3,−1/3)	(0.325 2, −0.324 8)	(0.008 2,0.008 6)
	(23/2,−17/2)	(11.492 5,−8.498 2)	(0.007 5, 0.001 8)

表2　五角大楼图片配准结果与其他算法的比较

真实位移	文献[13]	文献[14]	本文方法
(0.50, −0.50)	(0.48, −0.51)	(0.495, −0.496)	(0.500 0, −0.497 9)
(0.25, 0.50)	(0.28, 0.49)	(0.256, 0.499)	(0.250 1, 0.510 6)
(−0.25, −0.50)	(−0.25, −0.52)	(−0.250, −0.510)	(−0.247 4, −0.494 0)
(0.00, 0.75)	(0.00, 0.80)	(0.013, 0.745)	(0.000 0, 0.763 1)

强鲁棒性也是该方法用于三维重建的重要优势。相位相关建立在傅里叶平移理论上，将空间域信息转换到频率域，对色调亮度变化不敏感。该算法只选取傅里叶逆变换矩阵能量最集中的9个点进行拟合，计算误差和噪声对这些高能量点的影响相对较小，对最终计算精度影响不明显。实际应用中两幅图片拍摄的时间和设备是不同的，这些原因带来的干扰源常有如下类型：采集设备不同带来的色调和亮度的差异；采集时间不同场景本身发生变化(车辆移动，建筑物新增或拆除等)形成的噪声，文献[13-14]都没有考虑噪声对配准的影响。图3b在不同干扰下的表现分别为图3c椒盐噪声、图3d色调变化、图3e亮度变化、图3f局部突变。表3是本文算法在有不同干扰源下的计算结果，在存在干扰的情况下误差有不同程度的增大，但仍然保持了良好的精度。

表3　在不同干扰源干扰下的配准计算结果

干扰类型	真实值	计算值	误差
无干扰	(4/3,2/3)	(1.333 7,0.674 9)	(0.000 4,0.008 2)
椒盐噪声	(4/3,2/3)	(1.329 0,0.650 4)	(0.004 4,0.016 2)
亮度变化	(4/3,2/3)	(1.344 1,0.663 4)	(0.010 8,0.003 3)
色调变化	(4/3,2/3)	(1.332 5,0.676 8)	(0.000 9,0.010 1)
局部突变	(4/3,2/3)	(1.324 2,0.684 4)	(0.009 1,0.017 7)

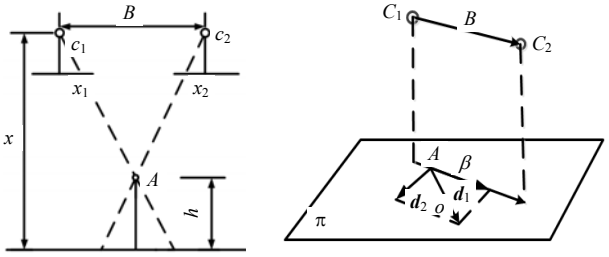
2　三维重建

在精确计算微小视差的基础上，本文拓展了已有的窄基线重建理论，增加了主方向的概念。将主方向定义为基线(即摄像机连线)在成像面上的投影，无需矫正进行重建，避免了由于矫正过程产生的误差，提高了重建结果的精确度与可信度。

2.1　原理

三维重建理论示意图如图4所示，C_1与C_2是距离为B高度为H的两台相机，A是高度为h的点，A在两幅图片的视差为$d = x_l - x_r$。文献[1]提到并证明了在窄基线的情况下，如果$h << H$，可以推导出$h = kd$。其中k是一个与B、H等内外部参数有关的常数。文献[2-3]也使用了相同的理论基础。根据此理论只要计算空间一点的视差即可获得该点的高度信息。

上述原理的基础是视差$\boldsymbol{d}$与基线B方向相同，但实际应用中，如图4b所示，由于拍摄过程中产生的畸变等原因，视差往往不与基线具有相同的方向，同时基线B的方向也是未知的。已有方法通常先将图像进行矫正，使视差集中于图像的水平方向，但矫正过程会引入误差，将会对窄基线重建结果的可信性和精度产生显著的影响。为解决该问题，本文将基线在成像面上投影的方向定义为主方向$\boldsymbol{\beta}$，视差$\boldsymbol{d}$在$\boldsymbol{\beta}$的投影便与基线具有相同的方向，再利用已有理论即可计算出高度h，视差$\boldsymbol{d}$可以通过在两幅图像中截取以该点为中心的小窗，利用亚象元配准技术计算小窗之间的位移量获得。



a. 经典窄基线重建　　b. 主方向投影

图4　三维重建理论示意图

更具体地，图4b中C_1与C_2是两台相机，本文算法假定它们具有相同的内参数与拍摄角度且处于同一高度，在该情况下，它们成像面重合成同一个平面π。C_1与C_2连线为基线B，主方向$\boldsymbol{\beta}$是B在π上的投影的方向向量($|\boldsymbol{\beta}|=1$)，对于空间中一点A利用小窗配准计算得到它的视差为$\boldsymbol{d}$，将$\boldsymbol{d}$投影到$\boldsymbol{\beta}$上得到$\boldsymbol{d}_1$，t是$\boldsymbol{d}_1$在$\boldsymbol{\beta}$上投影的长度，即$\boldsymbol{d}_1 = t\boldsymbol{\beta}$。之后再利用公式$h = kt$计算出深度$h$。

在应用中连线B通常是未知的但是主方向$\boldsymbol{\beta}$可以通过统计方法获得，对立体像对中所有点的视差求和，并进行了单位化以方便后续计算公式为：

$$\boldsymbol{\beta} = \sum_{i=1}^{n}\sum_{j=1}^{m}\boldsymbol{d}_{ij} \Big/ \left|\sum_{i=1}^{n}\sum_{j=1}^{m}\boldsymbol{d}_{ij}\right| \tag{11}$$

式中，m、n为两幅图片重叠区域的高度和宽度$\boldsymbol{d}_{ij}$表示图像(i, j)点的位移。投影使用基础的向量投影公式$t = \boldsymbol{d}\cdot\boldsymbol{\beta}$。通过计算得到$t$后，代入$h = kt$，计算出$h$，进行欧式重建，其中$k$是一个常数。

2.2　算法

重建算法流程如图5所示，为便于配准计算首先对两幅图片转化成灰度图，在计算深度信息前对两

幅图片进行整体配准，裁剪掉不相关的边缘区域。之后使用小窗口逐点计算位视差矩阵$\boldsymbol{D}$：

$$\boldsymbol{D}=\begin{bmatrix}\boldsymbol{d}_{11} & \boldsymbol{d}_{12} & \cdots & \boldsymbol{d}_{1n}\\ \boldsymbol{d}_{21} & \boldsymbol{d}_{22} & & \\ \vdots & & \ddots & \\ \boldsymbol{d}_{m1} & \boldsymbol{d}_{m2} & & \boldsymbol{d}_{mn}\end{bmatrix} \tag{12}$$

式中，$\boldsymbol{d}_{ij}=(\Delta x_{ij},\Delta y_{ij})$，代入式(11)计算出主方向，将每一点的视差向主方向投影得到该点的深度信息。最后对计算得到的深度信息进行后处理最终得到三维模型。后处理使用了中值滤波和平滑技术，用于去掉噪声。

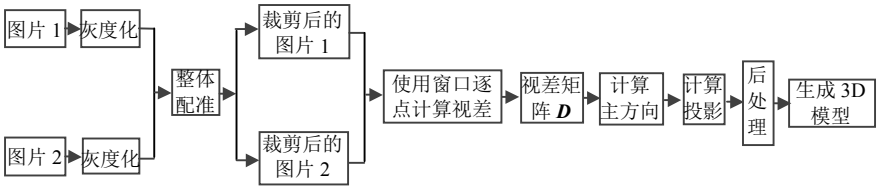


图5 三维重建流程图

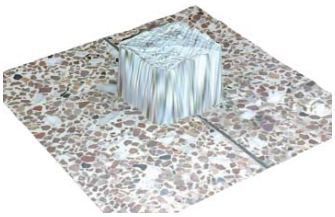
3 实验

图6a～图6h是该方法对纸质模型的的实验，使用半径16的配准窗。图6i～图6r是对脚印、五角大楼和某山谷的实验，配准窗半径为32、32和48。可见该方法对不同尺度的场景都有较好的重建效果。

a. 方盒图片一

b. 方盒图片二

c. 方盒实物

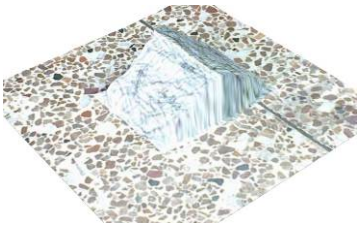


d. 方盒重建效果

e. 斜面图片2

f. 斜面图片2

g. 斜面实物



h. 斜面重建效果

i. 脚印图片1

j. 脚印图片2

k. 脚印图片重建效果

l. 五角大楼航拍图片1

m. 五角大楼航拍图片2

n. 五角大楼重建效果

o. 航拍图片1

p. 航拍图片2

q. 航拍重建效果1

r. 航拍重建效果2

图6　实验结果

4　结　语

可信精细三维重建一直受到配准技术精度与图像矫正误差的负面影响，本文提出了一种无需矫正的高精度可信窄基线三维欧氏重建算法，避免了不当矫正对重建的干扰。首先，用结合相位相关原理和曲线拟合技术获得高精度视差，该方法对噪声、色调亮度变化不敏感，计算精度达到亚象元；然后，拓展原有重建理论,针对窄基线情况，不经矫正，直接进行三维重建，把各点视差在主方向(基线在成像面上的投影)进行投影，据视差投影与深度的正比例关系计算出深度信息。该算法在高精度计算视差的同时排除了矫正对重建的不良影响，精度高鲁棒性强。

参　考　文　献

[1] MORGAN G L K, LIU J G, YAN H S. Precise subpixel disparity measurement from very narrow baseline stereo[J]. IEEE Trans Geoscience and Remote Sensing, 2010, 48(9): 3424-3432.

[2] IGUAL J P L, GARRIDO L, ALMANSA A, et al. Automatic low baseline stereo in urban areas[J]. Inv Probl Imag, 2007, 1(2): 319-348.

[3] DELON J, ROUGÉ B. Small baseline stereovision[J]. J Math Imaging Vis, 2007, 28(3): 209-223.

[4] BARNARD S T, FISCHLER M A. Computational stereo[J]. ACM Computing Surveys, 1982, 14(4): 553-572.

[5] STRECHA C, PylVÄANÄAINEN T, FUA P. Dynamic and scalable large scale image reconstruction[C]//IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. [S.l.]: IEEE, 2010.

[6] FURUKAWA Y, PONCE J. Accurate, dense, and robust multi-view stereopsis[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2010, 32(8): 1362-1376.

[7] BROWN M Z, BURSCHKA D, HAGER G D. Advances in computational stereo[J]. Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2003, 25(8): 993-1008.

[8] 张峰, 史利民, 孙凤梅, 等. 一种基于图像的室内大场景自动三维重建系统[J]. 自动化学报, 2010, 36(5): 625-633.
ZHANG Feng, SHI Li-min, SUN Feng-mei, et al. An image based 3D reconstruction system for large indoor scenes[J]. Acta Automatica Sinica, 2010, 36(5): 625-633.

[9] 郭复胜, 高伟. 基于辅助信息的无人机图像批处理三维重建方法[J]. 自动化学报, 2013, 39(6): 834-845.
GUO Fu-sheng, GAO Wei. Batch reconstruction from UAV images with prior information[J]. Acta Automatica Sinica, 2013, 39(6): 834-845.

[10] MORGAN G L K, LIU J G, YAN H S. Sub-pixel stereo-matching for DEM generation from narrow baseline stereo imagery[C]//Geoscience and Remote Sensing Symposium. [S.l.]: IEEE, 2008.

[11] ZITOVA´B, FLUSSER J. Image registration methods: a survey[J]. Image and Vision Computing, 2003, 21(11):

977-1000.
[12] KUGLIN C D, HINES D C. The phase correlation image alignment method[J]. Proc Int Conf Cybernetics and Society, 1975(9): 63-165.
[13] FOROOSH H, ZERUBIA J, BERTHOD M. Extension of phase correlation to sub-pixel registration[J]. IEEE Trans Image Processing, 2002, 11(3): 188-200.
[14] BALCI M, FOROOSH H. Subpixel estimation of shifts directly in the Fourier domain[J]. IEEE Trans Image Processing, 2006, 15(7): 1965-1972.
[15] 沈永林, 刘军, 吴立新, 等. 基于无人机影像和飞控数据的灾场重建方法研究[J]. 地理与地理信息科学, 2011, 27(6): 13-17.
SHEN Yong-lin, LIU Jun, WU Li-xin, et al. Reconstruction of disaster scene from UAV images and ight-control data[J]. Geography and Geo-Information Science, 2011, 27(6): 13-17.

编 辑 税 红