

# 基于扩展相位相关的小基高比立体匹配方法

马宁<sup>1,2</sup>, 门宇博<sup>1</sup>, 门朝光<sup>1</sup>, 李香<sup>1</sup>

(1. 哈尔滨工程大学计算机科学与技术学院, 黑龙江哈尔滨 150001;  
2. 哈尔滨师范大学计算机科学与信息工程学院, 黑龙江哈尔滨 150001)

**摘要:** 为获得高精度亚像素级视差以满足小基高比摄影测量需求, 提出一种基于扩展相位相关的小基高比立体匹配方法. 该方法采用分步式策略, 首先利用自适应窗口匹配法计算整像素级视差, 然后在整像素级视差的指导下建立同名像点之间的对应关系, 再分别以左右同名像点为中心截取子图像, 最后利用扩展相位相关匹配法对子图像进行亚像素级匹配, 获得亚像素级视差. 采用小基高比立体像对和带有亚像素级视差的模拟立体像对进行实验, 结果表明基于扩展相位相关的小基高比立体匹配方法在精度和效率方面具有优越性能.

**关键词:** 立体匹配; 小基高比; 相位相关; 亚像素视差

**中图分类号:** TP391.4      **文献标识码:** A      **文章编号:** 0372-2112 (2017)08-1827-09

**电子学报 URL:** <http://www.ejournal.org.cn>      **DOI:** 10.3969/j.issn.0372-2112.2017.08.004

## A Small Baseline Stereo Matching Method Based on Extended Phase Correlation

MA Ning<sup>1,2</sup>, MEN Yu-bo<sup>1</sup>, MEN Chao-guang<sup>1</sup>, LI Xiang<sup>1</sup>

(1. College of Computer Science and Technology, Harbin Engineering University, Harbin, Heilongjiang 150001, China;  
2. College of Computer Science and Information Engineering, Harbin Normal University, Harbin, Heilongjiang 150001, China)

**Abstract:** A small baseline stereo matching method based on extended phase correlation is proposed to obtain high precision sub-pixel disparity for small baseline photogrammetry. The multi-step strategy is adopted in this method. Firstly, the integer pixel disparity is calculated by an adaptive support window local matching method. Then the relationship of corresponding points is established under the guidance of integer pixel disparity. The sub images are extracted through selecting the corresponding points as the center. Finally, the sub-pixel disparity is obtained by matching the sub images utilizing an extended phase correlation matching method. The experiments are carried out by using the small baseline stereo image pair and artificial synthesis stereo image pair with sub-pixel disparity, the results show that the small baseline stereo matching method based on extended phase correlation has superior performance on precision and efficiency.

**Key words:** stereo matching; small baseline; phase correlation; sub-pixel disparity

## 1 引言

立体匹配是计算机视觉和摄影测量领域的研究热点. 利用立体匹配可以实现全球范围高精度地表高程快速获取<sup>[1]</sup>. 基高比是摄影基线长度与摄像机高度的比值. 根据立体视觉模型可知: 地面目标的高程精度与基高比成反比, 当视差精度一定时基高比越小, 高程误差越大<sup>[2]</sup>. 传统摄影测量采用大基高比立体匹配来保障高程精度, 视差只需达到整像素级<sup>[3]</sup>. 但大基高比立体像对存在大量遮挡、几何畸变和辐射差异, 导致误匹

配率高, 需人工辅助和后期修正才能完成高程测量<sup>[4]</sup>. 小基高比立体像对具有遮挡范围小、几何畸变小、辐射差异小等优点, 可解决上述不利因素对匹配的影响, 小基高比立体匹配已成为新的研究热点<sup>[5-7]</sup>. 但小基高比如要获得与大基高比相同的高程精度, 视差需精确到 $1/T$ 像素,  $T$ 为大小基高比的比值<sup>[3]</sup>. 小基高比立体匹配的核心问题是如何获得高精度亚像素级视差.

亚像素级立体匹配方法可以归纳为插值法、拟合法和全局优化法. 插值法利用插值函数上采样立体像对或匹配代价, 通过匹配插值后的立体像对或搜索插

值后的代价空间极值获得亚像素级视差<sup>[8-10]</sup>. 该方法视差精度受插值方式、上采样频率及信噪比等因素限制. 拟合法利用抛物线函数拟合代价空间的峰值邻域, 通过搜索抛物线函数极值获得亚像素级视差<sup>[11,12]</sup>. 该方法效率高, 计算量小, 但视差精度低. 全局优化法通过求解基于连续视差场的全局能量函数极小值, 获得亚像素级视差<sup>[13,14]</sup>. 该方法获得的视差具有平滑连续性, 但精度较低. 综上所述, 现有的亚像素级立体匹配方法均无法满足小基高比立体匹配对视差精度的要求, 本文提出一种基于扩展相位相关的小基高比立体匹配方法, 用于获得高精度的亚像素级视差.

## 2 算法框架

本文算法匹配经极线校正的立体像对, 并最终获得亚像素级的视差. 极线校正就是将立体像对的对应极线调整为平行于水平方向的技术. 原始的小基高比立体像对需要预先极线校正, 才可作为本文算法的输入数据. 由于相位相关法在视差搜索范围较大时稳定性差<sup>[7]</sup>, 因此本文采用分步式策略, 首先对立体像对做整像素级预匹配, 在整像素视差的指导下, 建立同名像点间的对应关系, 然后分别以同名像点为中心截取子图像, 最后利用基于扩展相位相关方法对子图像进行亚像素级匹配. 在亚像素级匹配中, 提出基于等间隔采样的峰值估计方法提高视差精度. 算法整体框架如图 1 所示.

## 3 模型及算法关键步骤

### 3.1 小基高比立体模型分析

假设左图像  $L$  和右图像  $R$  组成经极线校正的、近似

$$C_{(x_0, y_0)}^L = \frac{\|L\|_{\varphi(x_0, y_0)}^2 (\nabla_x L(x, y))^2 - \langle L(x, y), \nabla_x L(x, y) \rangle_{\varphi(x_0, y_0)} L(x, y) \nabla_x L(x, y)}{\|L\|_{\varphi(x_0, y_0)}^4} \quad (3)$$

满足采样定理的小基高比立体像对, 该像对可用经典立体模型表示:

$$L(x, y) = R(x + d(x, y), y) + g_b(x, y) \quad (1)$$

式中,  $L(x, y)$  为左图像,  $R(x, y)$  为右图像,  $d(x, y)$  为描述  $L$  和  $R$  之间几何位置变化的有界视差函数, 包括整像素视差  $d_i(x, y)$  和亚像素视差  $d_s(x, y)$ ,  $g_b(x)$  为标准差  $\sigma_b$  的高斯噪声与平滑函数  $g$  的卷积. 大小基高比成像方式如图 2 所示, 小基高比立体像对在两次成像时仅有微小的摄像角度变化, 可以减少物体遮挡和非朗伯表面对辐射差异的影响, 在这种条件下拍摄的立体像对可以近似满足经典立体模型. 该模型假设  $L$  和  $R$  之间仅存在几何位置变化和噪声, 几乎没有遮挡和辐射差异, 这只有在小基高比条件下才能满足, 随着基高比减小模型会更加精确. 但是, 当基高比小于 0.01 时, 噪声误差会成为匹配误差中不可控制的主导因素<sup>[2]</sup>. 目前通常将基高比选定在 0.01 ~ 0.1 范围, 该范围使得立体像对能够近似满足经典立体模型, 且噪声误差可以通过算法的设计进行控制<sup>[2-4,6]</sup>.

### 3.2 整像素级预匹配

整像素级预匹配可以获得同名像点之间的粗略对应关系. 本文采用自适应窗口方法做整像素级预匹配, 支撑窗口的大小通过噪声引起的匹配误差进行调节, 以此提高准确率. 由文献[2]可知当像点  $(x_0, y_0)$  选择  $\varphi_{(x_0, y_0)}$  为支撑窗口时, 由噪声引起的匹配误差  $N_e$  为:

$$N_e(L, g, \sigma_b, \varphi_{(x_0, y_0)}) = \frac{\sigma_b \|g\|_{\varphi(x_0, y_0)}^2}{\|L\|_{\varphi(x_0, y_0)} \sqrt{\langle C_{(x_0, y_0)}^L, 1 \rangle_{\varphi(x_0, y_0)}}} \quad (2)$$

式中,  $\langle \cdot, \cdot \rangle_{\varphi(x_0, y_0)}$ ,  $\|\cdot\|_{\varphi(x_0, y_0)}$  分别为内积和范数,  $C_{(x_0, y_0)}^L$  为图像  $L$  在像点  $(x_0, y_0)$  处的密度函数:

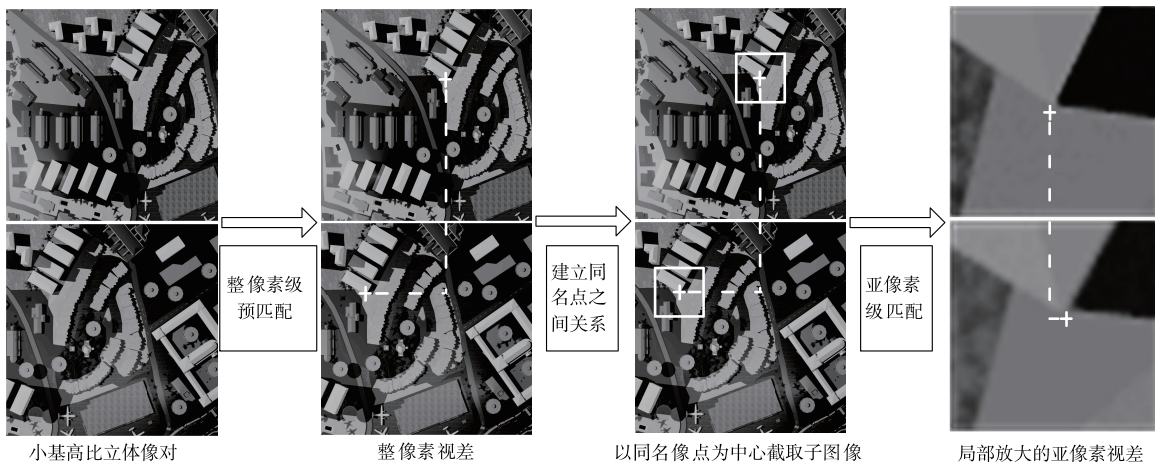


图1 算法框架示意图

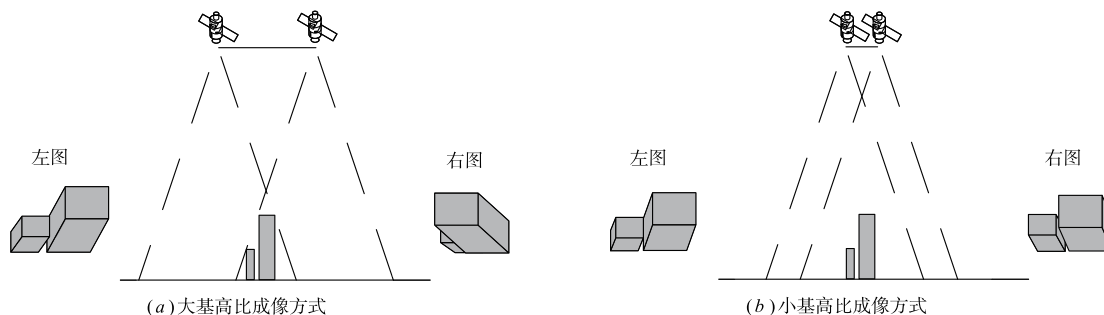


图2 大小基高比成像方式

式(3)中,  $\nabla_x L(x, y)$  为图像水平方向导数. 式(2)中的  $\langle C_{(x_0, y_0)}^L, 1 \rangle_{\varphi_{(x_0, y_0)}}$  称为相关曲率, 仅依赖于  $L$  本身, 因此在已知成像系统的噪声偏差和匹配窗口大小的情况下, 给定匹配误差阈值, 可通过式(2)自适应地为像点确定支撑窗口大小, 以提高准确率. 窗口计算公式为:

$$\varphi'_{(x_0, y_0)} = \min \left\{ \varphi_{(x_0, y_0)} \left| \frac{\sigma_b \|g\|_{\varphi_{(x_0, y_0)}}^2}{\|L\|_{\varphi_{(x_0, y_0)}} \sqrt{\langle C_{(x_0, y_0)}^L, 1 \rangle_{\varphi_{(x_0, y_0)}}}} < \varepsilon \right. \right\} \quad (4)$$

式中,  $\varphi'_{(x_0, y_0)}$  为像点  $(x_0, y_0)$  满足误差阈值  $\varepsilon$  的最优支撑窗口,  $\varepsilon$  的选取与所能接受的高程误差相关. 为像点  $(x_0, y_0)$  自适应选择  $\varphi'_{(x_0, y_0)}$  后, 将窗口在  $R$  中平移  $d_z$  像素以确定其匹配像点及窗口, 计算这两个窗口的互相关函数, 选择最大相关值对应的  $d_z$  作为  $(x_0, y_0)$  的整像素视差:

$$d_z(x_0, y_0) = \arg \max_{d_z} \frac{\langle \tau_{d_z} R, L \rangle_{\varphi_{(x_0, y_0)}}}{\tau_{d_z} R_{\varphi'_{(x_0, y_0)}} L_{\varphi'_{(x_0, y_0)}}} \quad (5)$$

式中,  $d_z(x_0, y_0)$  为  $(x_0, y_0)$  的整像素视差,  $\tau_{d_z} R$  为  $R$  水平移动  $d_z$  个像素单位.

### 3.3 基于扩展相位相关的亚像素级匹配

根据整像素视差建立同名像点的对应关系,  $L$  中视差为  $d_z(x_0, y_0)$  的像点  $(x_0, y_0)$ , 其在  $R$  中的同名像点为  $(x_0 + d_z(x_0, y_0), y_0)$ . 分别以同名像点为中心截取子图像  $L_s(x, y)$  和  $R_s(x, y)$ , 子图大小为像点的支撑窗口大小,  $L_s(x, y)$  和  $R_s(x, y)$  之间仅存在小范围的视差平移. 本文采用扩展相位相关法匹配子图像, 使视差精度达到亚像素级别. 算法流程如图3所示, 首先对子图像加窗, 然后计算加窗子图像的相位相关函数, 最后利用基于等间隔采样的峰值估计方法获取精确的峰值位置, 得到亚像素级视差.

设  $L_s(x, y) = R_s(x + \Delta x, y + \Delta y)$ ,  $(\Delta x, \Delta y)$  为水平和垂直方向的平移量, 图像大小为  $M \times N$ , 对子图像做二维傅里叶变换:

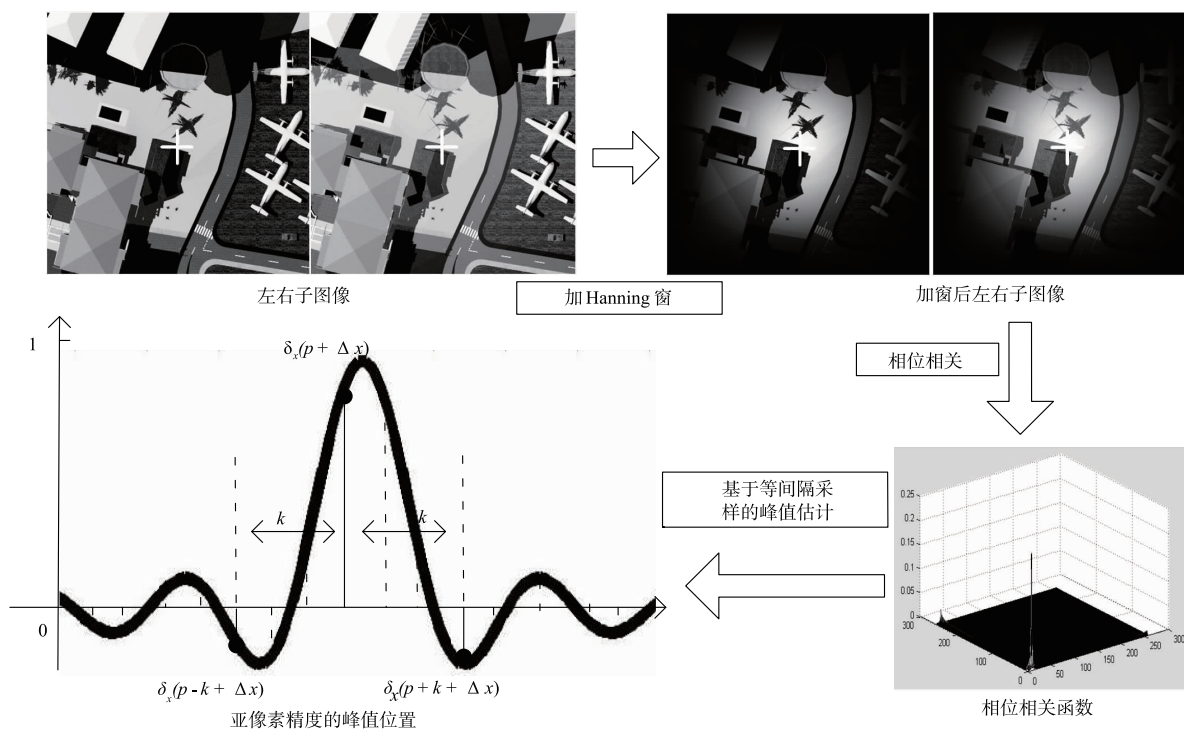


图3 基于扩展相位相关的亚像素级匹配流程图

$$L_s^F(u, v) = R_s^F(u, v) \exp\left(-j2\pi\left(\frac{u\Delta x}{M} + \frac{v\Delta y}{N}\right)\right) \quad (6)$$

式中,  $L_s^F(u, v)$  和  $R_s^F(u, v)$  分别为  $L_s(x, y)$  和  $R_s(x, y)$  的傅里叶变换. 为减小频谱泄漏和混叠引起的匹配误差, 变换前对子图像进行 Hanning 窗处理, 加窗函数为:

$$w(x, y) = \frac{1 + \cos(\pi x/M)}{2} \frac{1 + \cos(\pi y/N)}{2} \quad (7)$$

两幅子图像的相位相关函数可通过互功率谱  $Q(u, v)$  的傅里叶逆变换得到:

$$Q(u, v) = \frac{L_s^F(u, v) R_s^F(u, v)}{|L_s^F(u, v) R_s^F(u, v)|} = \exp\left(-j2\pi\left(\frac{u\Delta x}{M} + \frac{v\Delta y}{N}\right)\right) \quad (8)$$

$$\delta(x + \Delta x, y + \Delta y) = F^{-1}(Q(u, v)) \quad (9)$$

式中,  $R_s^F(u, v)$  和  $L_s^F(u, v)$  互为复共轭,  $F^{-1}(\cdot)$  为傅里叶逆变换函数,  $\delta(x + \Delta x, y + \Delta y)$  为相位相关函数, 该函数是在  $(\Delta x, \Delta y)$  处出现峰值的脉冲函数, 根据峰值位置可确定平移量  $(\Delta x, \Delta y)$ . 但由于数字图像的离散性, 峰值位置只能对应整像素级平移量.

为获得亚像素级平移量, 常采用拟合法对峰值邻域做曲面拟合. 但这种方法仅考虑了峰值邻域, 忽略了  $\delta$  在空域内的分布状态, 因此精度较低. 子图像的  $\delta$  函数可以通过 sinc 函数近似表示:

$$\delta(x + \Delta x, y + \Delta y) \approx \frac{\sin(\pi(x + \Delta x))}{\pi(x + \Delta x)} \frac{\sin(\pi(y + \Delta y))}{\pi(y + \Delta y)} = \text{sinc}(x + \Delta x, y + \Delta y) \quad (10)$$

sinc 函数能在理想条件下描述  $\delta$  函数的空域分布, 但是在实际匹配中, 由于随机噪声、混叠等干扰因素导致峰值下降, sinc 函数不能准确描述  $\delta$  的空域分布状态. 本文引入相位相关系数  $\alpha$  对 sinc 函数进行改进:

$$\text{sinc}'(x + \Delta x, y + \Delta y) = \alpha \frac{\sin(\pi(x + \Delta x))}{\pi(x + \Delta x)} \frac{\sin(\pi(y + \Delta y))}{\pi(y + \Delta y)} \quad (11)$$

式中,  $\text{sinc}'(x + \Delta x, y + \Delta y)$  为改进的 sinc 函数. 当平移量为整像素且无干扰因素时,  $\alpha = 1$ ; 当平移量为亚像素或存在干扰因素时,  $\alpha < 1$ . 由于本文处理的是极线校正像对, 可认为垂直方向平移为 0, 因此将  $\text{sinc}'(x + \Delta x, y + \Delta y)$  在空域上分离变量, 得到水平方向的一维函数:

$$\text{sinc}'_x(x + \Delta x) = \alpha \frac{\sin(\pi(x + \Delta x))}{\pi(x + \Delta x)} \quad (12)$$

式中,  $\text{sinc}'_x(x + \Delta x)$  为一维 sinc' 函数, 其峰值位置为期望求取的平移量. 本文提出一种基于等间隔采样的峰值估计方法用于提高精度.

设  $p$  为水平方向相位相关函数  $\delta_x(x + \Delta x)$  的峰值位置,  $p - k, p + k$  是在水平方向与  $p$  相距  $k$  像素的点, 三个样本点的相位相关值  $\delta_x(p - k + \Delta x), \delta_x(p + \Delta x), \delta_x(p + k + \Delta x)$  满足:

$$\begin{cases} \alpha \frac{\sin(\pi(p - k + \Delta x))}{\pi(p - k + \Delta x)} = \delta_x(p - k + \Delta x) & \textcircled{1} \\ \alpha \frac{\sin(\pi(p + \Delta x))}{\pi(p + \Delta x)} = \delta_x(p + \Delta x) & \textcircled{2} \\ \alpha \frac{\sin(\pi(p + k + \Delta x))}{\pi(p + k + \Delta x)} = \delta_x(p + k + \Delta x) & \textcircled{3} \end{cases} \quad (13)$$

整理得:

$$\begin{cases} (\alpha/\pi)(\sin(\pi(p + \Delta x))) = (\delta_x(p + \Delta x))(p + \Delta x) & \textcircled{1} \\ (\alpha/\pi)(2\sin(\pi(p + \Delta x))\cos(\pi k)) \\ = (\delta_x(p - k + \Delta x))(p - k + \Delta x) + (\delta_x(p + k + \Delta x)) \\ \cdot (p + k + \Delta x) & \textcircled{2} \end{cases} \quad (14)$$

将式①与②相加得:

$$\begin{aligned} & (\delta_x(p - k + \Delta x))(p - k + \Delta x) + (\delta_x(p + k + \Delta x)) \\ & \cdot (p + k + \Delta x) = 2(\delta_x(p + \Delta x))(p + \Delta x) \cos(\pi k) \end{aligned} \quad (15)$$

将式(15)整理为线性表达式:

$$a(p, k) \cdot \Delta x = b(p, k) \quad (16)$$

式中,  $a(p, k)$  和  $b(p, k)$  分别为:

$$a(p, k) = \delta_x(p - k + \Delta x) + \delta_x(p + k + \Delta x) - 2\cos(\pi k)\delta_x(p + \Delta x) \quad (17)$$

$$b(p, k) = 2p\cos(\pi k)\delta_x(p + \Delta x) - (p - k)\delta_x(p - k + \Delta x) + (p + k)\delta_x(p + k + \Delta x) \quad (18)$$

亚像素级精度的水平方向平移  $\Delta x$  为:

$$\Delta x = a(p, k)^{-1}b(p, k) \quad (19)$$

为减少噪声样本对峰值估计的影响, 选取多组等间隔样本点进行最小二乘法拟合. 设选取  $H$  组等间隔样本点  $(p_i - k, p_i, p_i + k)$  ( $i = 1, 2, \dots, H$ ) 用于峰值位置估计, 最小二乘目标函数为:

$$\min \left( \sum_{i=1}^H |b(p_i, k_i) - a(p_i, k_i) \cdot \Delta x|^2 \right) \quad (20)$$

$\Delta x$  可根据最小二乘方程组求得:

$$\Delta x = (\mathbf{A}^T \mathbf{A})^{-1} \mathbf{A}^T \mathbf{B} \quad (21)$$

式中  $\mathbf{A}, \mathbf{B}$  分别为:

$$\mathbf{A} = [a(p_1, k_1), a(p_2, k_2), \dots, a(p_H, k_H)]^T \quad (22)$$

$$\mathbf{B} = [b(p_1, k_1), b(p_2, k_2), \dots, b(p_H, k_H)]^T \quad (23)$$

参数  $p_i, k_i$  选择如下:

$$p_1 = p_2 = \dots = p_H = \arg \max_x \delta_x(x + \Delta x) \quad (24)$$

$$k_1 = 1, k_2 = k_1 + \Delta k, \dots, k_H = k_{H-1} + \Delta k, (\Delta k = 1) \quad (25)$$

获得的两幅子图像水平方向平移量  $\Delta x$ , 即为子图像中心像点  $(x_0, y_0)$  的水平方向亚像素视差  $d_s(x_0, y_0)$ .

$$d_s(x_0, y_0) = \Delta x \quad (26)$$

最后将像点  $(x_0, y_0)$  的整像素视差与亚像素视差结合, 得到最终视差结果:

$$d(x_0, y_0) = d_z(x_0, y_0) + d_s(x_0, y_0) \quad (27)$$

## 4 实验结果与分析

采用 VS2010 + OpenCV 编程实现算法,在配置环境为 Intel i5 CPU 2.40GHz 处理器,6GB 内存,64 位 Win7 操作系统的计算机上进行实验.选用已知亚像素级视差的模拟立体像对和小基高比立体像对作为实验数据.

### 4.1 时间复杂度分析

设立体像对共有  $N_1$  个待匹配像点,自适应窗口的取值范围为  $[\varphi_{\min}, \varphi_{\max}]$ ,直接实现窗口选择式(4)的时间复杂度为  $O\left(N_1 \cdot \sum_{\varphi=\varphi_{\min}}^{\varphi_{\max}} \varphi\right)$ ,计算互相关函数式(5)的时间复杂度为  $O(N_1 \cdot \varphi \cdot d)$ ,其中  $d$  为视差范围.但自适应窗口和互相关函数的计算均可以利用积分图像加速技术优化,优化后式(4)与式(5)的时间复杂度分别为  $O(N_1)$  和  $O(N_1 \cdot (d+1))$ ,本文整像素级预匹配步骤的时间复杂度为  $O(N_1 \cdot (d+1))$ .

本文亚像素匹配步骤的时间复杂度仅与子图像大小有关.设子图像中像点数为  $N_2$ ,快速傅里叶变换式(6)的时间复杂度为  $O(N_2 \cdot \log N_2)$ ,加窗式(7)的时间复杂度为  $O(N_2)$ ,互功率谱式(8)的时间复杂度为  $O(N_2)$ ,逆变换互功率谱的时间复杂度为  $O(N_2 \cdot \log N_2)$ .基于等间隔采样的峰值估计法本质上是对  $H$  组样本做最小二乘拟合, $H$  的最小值为 1,即峰值位置在最边缘的情况,最大取值为  $((\sqrt{N_2}-1)/2)$ ,即峰值位置在某一行行的正中位置,因此  $H < ((\sqrt{N_2}-1)/2)$ ,计算式(21)的时间复杂度为  $O(N_2)$ .本文单像点的亚像素级匹配步骤时间复杂度为  $O(N_2 \cdot \log N_2)$ ,全体像点的时间复杂度为  $O(N_1 \cdot N_2 \cdot \log N_2)$ .

选取插值法<sup>[9]</sup>、拟合法<sup>[11]</sup>与本文方法进行效率对比分析.文献[9]与[11]的整像素匹配步骤时间复杂度均为  $O(N_1 \cdot \varphi \cdot d)$ .在亚像素匹配步骤,文献[9]单像点的时间复杂度为  $O(d \cdot f_{\text{interpolation}})$ ,其中  $f_{\text{interpolation}}$  为插值倍数,全体像点时间复杂度为  $O(N_1 \cdot d \cdot f_{\text{interpolation}})$ .文献[11]单像点的时间复杂度为  $O(1)$ ,全体像点的时间复杂度为  $O(N_1)$ .表 1 给出了三种方法的时间复杂度及匹配小基高比立体像对的执行时间.表 1 中,文献[9]和文献[11]的整像素匹配复杂度较高,而本文方法的亚像素匹配复杂度较高.立体匹配中支撑窗口和子图像的大小远远小于完整图像,即  $\varphi \approx N_2 \leq N_1$ ,当  $\log N_2 < d$  时,本文方法时间复杂度低于文献[9]和文献[11]方法.通常子图像为  $30 \times 30 \sim 40 \times 40$  像素范围,像点数为 900 ~ 1600,  $\log N_2$  的取值范围为 9.814 ~ 10.644,而小基高比立体像对的视差范围通常在 10 ~ 20 像素,本实验采用的小基高比立体像对视差范围为 17 像素,因此本文方法的处理效率高于文献[9]和文献[11]方法.

表 1 时间复杂度对比表

| 方法       | 时间复杂度                          |   | 执行时间(s) |
|----------|--------------------------------|---|---------|
|          | 整像素匹配时间复杂度                     | 亚像素匹配时间复杂度                                      |         |
| 文献[9]方法  | $O(N_1 \cdot \varphi \cdot d)$ | $O(N_1 \cdot d \cdot f_{\text{interpolation}})$ | 60.348  |
| 文献[11]方法 | $O(N_1 \cdot \varphi \cdot d)$ | $O(N_1)$  | 54.117  |
| 本文方法     | $O(N_1 \cdot (d+1))$           | $O(N_1 \cdot N_2 \cdot \log N_2)$               | 39.495  |

### 4.2 模拟立体像对匹配精度分析

采用文献[4]的平移与下采样方法制作带有亚像素视差的立体像对.从法国卫星 Pleiades 拍摄的北京某地区遥感图像中截取两幅  $6000 \times 6000$  像素的图像,水平视差设为 5 像素,对两图做 4、6、8、10、12 倍下采样,得到视差分别为 1.25、0.833、0.625、0.5、0.417 像素的 5 组立体像对.图 4 显示了一组立体像对及匹配结果.图中选取 2 个子区域进行局部放大显示.图 4(a) 为 8 倍下采样的立体像对,水平视差为 0.625 像素.图 4(b) 为立体匹配结果,匹配网格间距为  $20 \times 20$  像素.

选取文献[9]和文献[11]方法与本文进行定量比较.以视差残差  $R_D$  作为评估指标, $R_D$  为理论视差与计算视差差值的绝对值,图 5 中(a)~(c)分别为  $R_D < = 0.05$ ,  $0.05 < R_D < = 0.1$ ,以及  $R_D > 0.1$  的像点占总点数的百分比,本文方法约 65% 像点的  $R_D < = 0.05$  像素,匹配精度高于文献[9]和文献[11].

### 4.3 小基高比立体像对匹配精度分析

采用空间机电研究所提供的小基高比立体像对进行实验.该像对具有亚像素级视差,且标注了 22 个靶标和 40 个建筑物的精确高程,可用于验证匹配精度和高程提取精度.像对的基高比为 0.05,左右图像从不同的视角拍摄,存在视角变化引起的图像差异,地面分辨率为 0.3 米/像素,重叠区域占整图的 60%.图 6 为小基高比立体像对及靶标、建筑物位置分布.图 7 为匹配结果,图 7(a) 为  $20 \times 20$  像素的网格匹配结果,图 7(b) 为靶标的匹配结果.图 8 为稠密匹配的深度图及其三维重建效果.

选取文献[9]和文献[11]方法与本文方法比较,以视差残差  $R_D$  和高程残差  $R_E$  作为评估指标, $R_E$  为理论高程与计算高程差值的绝对值.计算高程通过三角测量法根据计算视差求解获得.图 9 和图 10 分别显示了三种方法针对靶标和建筑物的匹配结果,根据结果可知本文方法的  $R_D$  和  $R_E$  在大部分靶标和建筑物位置低于文献[9]和文献[11]方法.表 2 为三种方法的  $R_D$  和  $R_E$  均值统计结果,本文方法的匹配精度和高程提取精度均高于文献[9]和文献[11]方法.22 个靶标的真实高程均值为 67.818m,40 个建筑物的真实高程均值为 112.353m.本文方法获得的靶标  $R_E$  均值为 0.303m,建筑物  $R_E$  均值为 0.406m.这样的高程提取精度可以满足小基高比摄影测量的需求,证明本文方法具有实际应用价值.



(a) 立体像对 (视差为0.625像素)



(b) 立体匹配结果

图4 立体像对及匹配结果

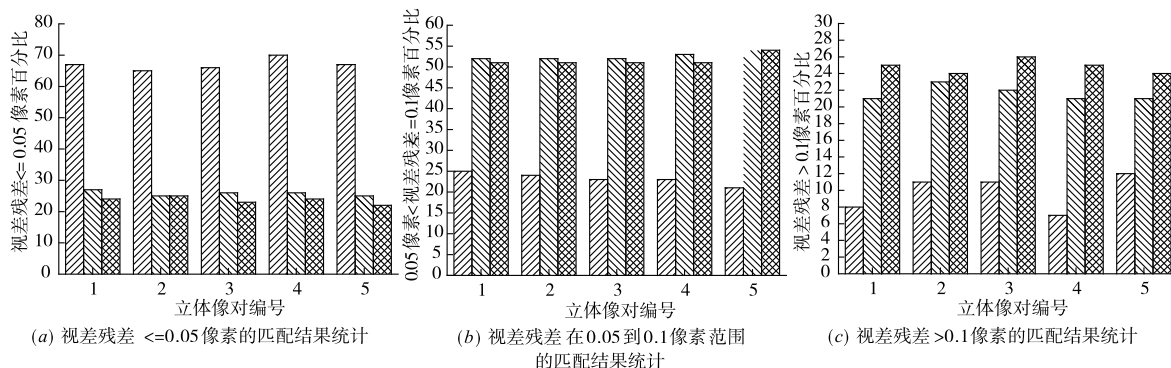
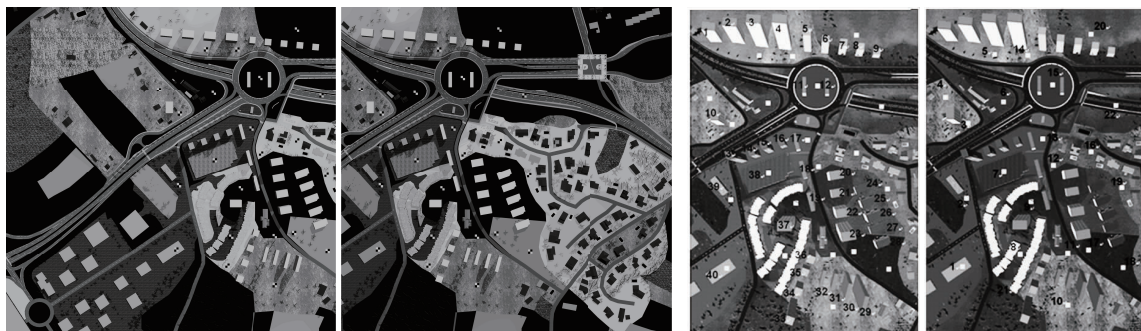


图5 实验结果对比 本文方法 文献[9]方法 文献[11]方法



(a) 小基高比立体像对 (基高比0.05)

(b) 靶标位置分布图

(c) 建筑物位置分布图

图6 小基高比立体像对及靶标、建筑物位置分布

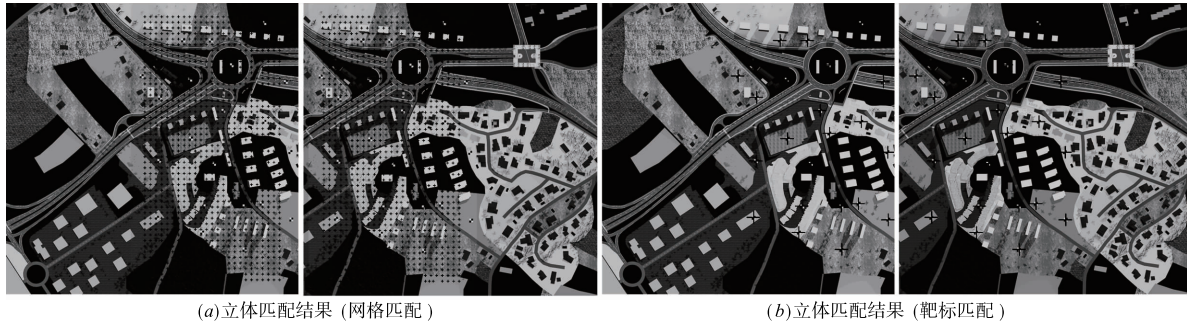


图7 小基高比立体像对匹配结果

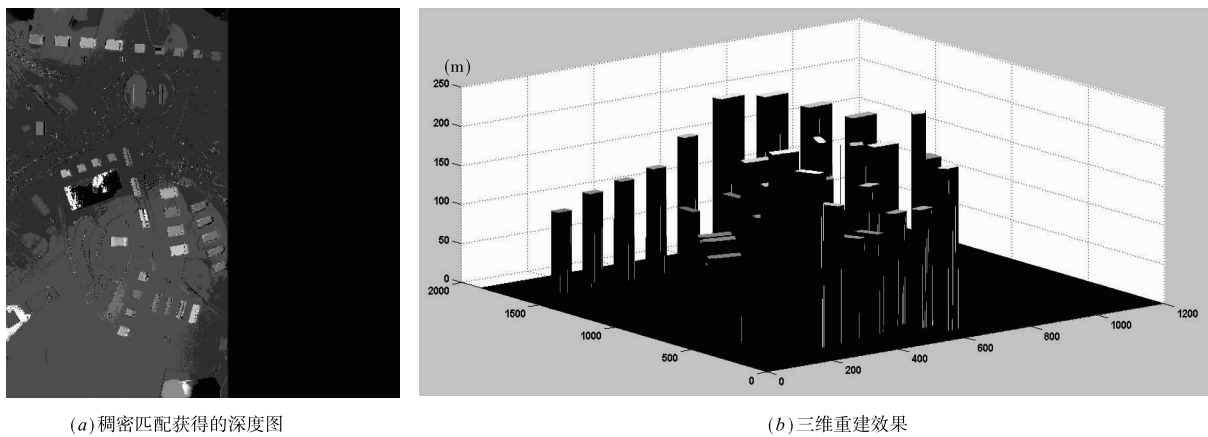


图8 深度图及其三维重建效果

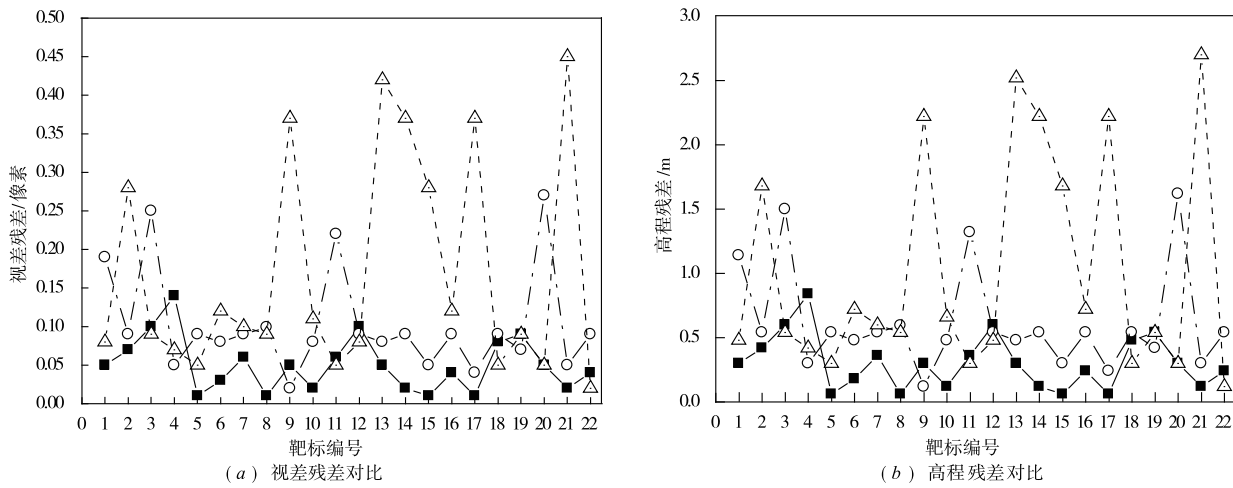


图9 靶标匹配结果 —■— 本文方法 —○— 文献[9]方法 —△— 文献[11]方法

表2 匹配结果统计表

|          | 靶标               |                 | 建筑物              |                 |
|----------|------------------|-----------------|------------------|-----------------|
|          | $R_D$ 均值<br>(像素) | $R_E$ 均值<br>(m) | $R_D$ 均值<br>(像素) | $R_E$ 均值<br>(m) |
| 文献[9]方法  | 0.103            | 0.619           | 0.114            | 0.681           |
| 文献[11]方法 | 0.169            | 1.012           | 0.133            | 0.797           |
| 本文方法     | <b>0.051</b>     | <b>0.303</b>    | <b>0.068</b>     | <b>0.406</b>    |

### 5 结论

本文提出一种精确的小基高比立体匹配方法. 设计了自适应窗口方法用于整像素级预匹配, 减小了亚像素级匹配的视差搜索范围. 提出基于扩展相位相关的匹配方法用于获得高精度亚像素级视差. 设计基于等间隔采样的峰值估计方法用于提高视差精度. 实验结果表明本方法在匹配精度与效率方面具有较好的效果.

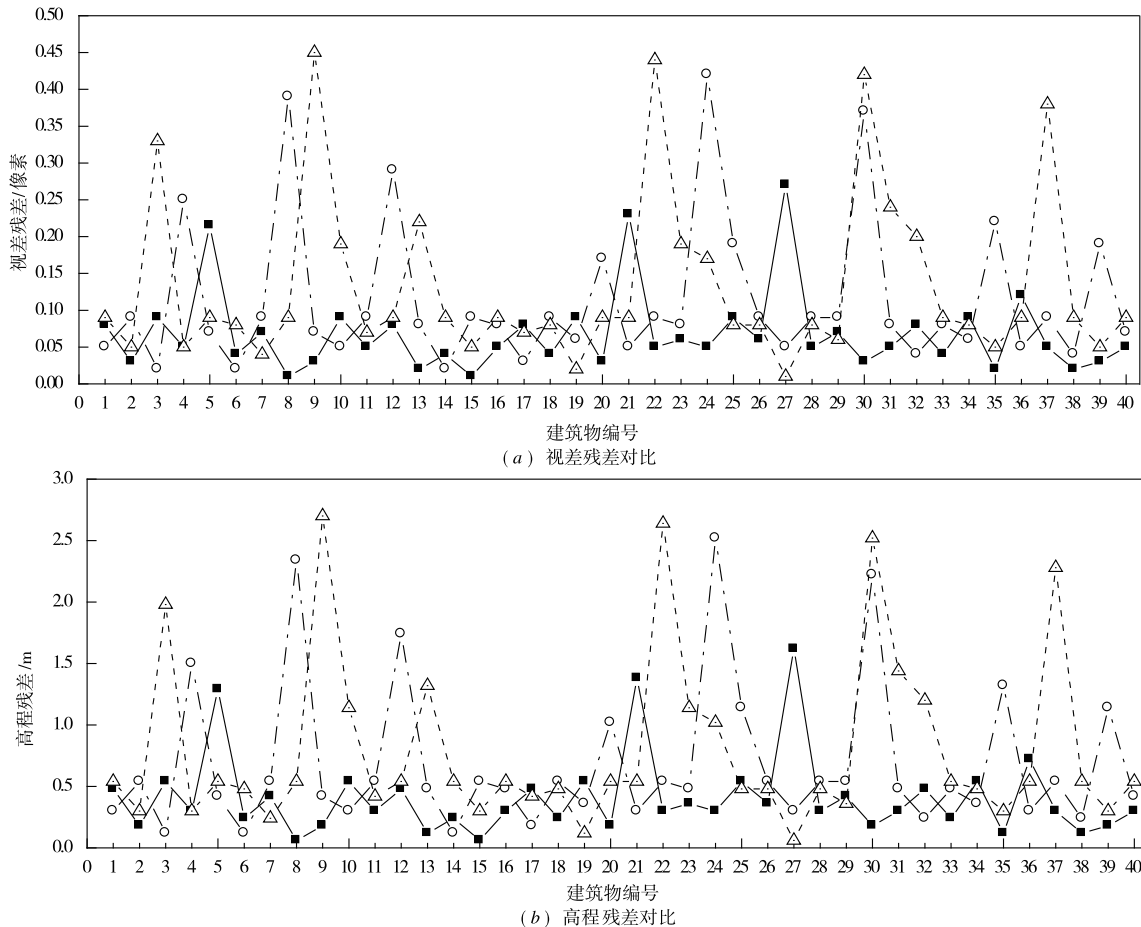


图10 建筑物匹配结果 —■— 本文方法 —○— 文献[9]方法 —△— 文献[11]方法

### 参考文献

- [1] 方勇,李瀛搏,胡海彦,等.小基高比航天摄影测量技术及初步验证[J].测绘科学与工程,2015,35(2):25-30.  
Fang Yong, Li Ying-bo, Hu Hai-yan, et al. The preliminary verification of space photogrammetry technology with small base-height ratio[J]. Geomatics Science and Engineering, 2015, 35(2): 25-30. (in Chinese)
- [2] Delon J, Rougé B. Small baseline stereovision[J]. Journal of Mathematical Imaging and Vision, 2007, 28(3): 209-223.
- [3] 边继龙,门朝光,李香.基于小基高比的快速立体匹配方法[J].电子与信息学报,2012,34(3):517-522.  
Bian Ji-long, Men Chao-guang, Li Xiang. A fast stereo matching method based on small baseline[J]. Journal of Electronics and Information Technology, 2012, 34(3): 517-522. (in Chinese)
- [4] 范大昭,申二华,李禄,等.基于相位相关的小基高比影像匹配方法[J].测绘科学技术学报,2013,30(2):154-157.  
Fan Da-zhao, Shen Er-hua, Li Lu, et al. Small baseline stereo matching method based on phase correlation[J]. Journal of Geomatics Science and Technology, 2013, 30(2): 154-157. (in Chinese)
- [5] Joshi N, Zitnick C L. Micro-baseline stereo[R]. Microsoft Research, 2014. 73.
- [6] Morgan G L K, Liu J G, Yan H. Precise subpixel disparity measurement from very narrow baseline stereo[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2010, 48(9): 3424-3433.
- [7] 申二华,范大昭,孙晓昱.基于SGM和相位相关的小基高比影像匹配[J].中国矿业大学学报,2015,44(1):183-188.  
Shen Er-hua, Fan Da-zhao, Sun Xiao-yu. Small baseline stereo matching method based on SGM and phase correlation[J]. Journal of China University of Mining and Technology, 2015, 44(1): 183-188. (in Chinese)
- [8] Mozerov M G, Van de Weijer J. Accurate stereo matching by two-step energy minimization[J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2015, 24(3): 1153-1163.
- [9] Miclea V C, Vancea C C, Nedevschi S. New sub-pixel interpolation functions for accurate real-time stereo-matching algorithms[A]. IEEE International Conference on Intelli-

- gent Computer Communication and Processing[C]. Romania:IEEE,2015. 173 – 178.
- [10] Sun X, Mei X, Jiao S, et al. Real-time local stereo via edge-aware disparity propagation[J]. Pattern Recognition Letters,2014,49:201 – 206.
- [11] Stentoumis C, Grammatikopoulos L, Kalisperakis I, et al. On accurate dense stereo-matching using a local adaptive multi-cost approach[J]. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing,2014,91:29 – 49.
- [12] Zbontar J, LeCun Y. Computing the stereo matching cost with a convolutional neural network[A]. Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition[C]. Boston:IEEE,2015. 1592 – 1599.
- [13] Tani ai T, Matsushita Y, Naemura T. Graph cut based continuous stereo matching using locally shared labels[A]. Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition[C]. Columbus:IEEE,2014. 1613 – 1620.
- [14] Wanner S, Goldluecke B. Variational light field analysis for disparity estimation and super-resolution[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence,2014,36(3):606 – 619.

## 作者简介



马 宁 男,1981 年生,黑龙江哈尔滨人,哈尔滨工程大学博士生,主要研究方向为图像处理.

E-mail:maning@hrbeu.edu.cn



门宇博 男,1989 年生,黑龙江哈尔滨人,哈尔滨工程大学博士生,主要研究方向为图像处理.

E-mail:menyubo@hrbeu.edu.cn



门朝光(通信作者) 男,1963 年生,黑龙江哈尔滨人,哈尔滨工程大学教授,主要研究方向为图像处理、信息安全.

E-mail:menchaoguang@hrbeu.edu.cn