

融合 SIFT 与 SGM 的倾斜航空影像密集匹配

吴军, 姚泽鑫, 程门门

桂林电子科技大学 电子工程与自动化学院, 广西壮族自治区 桂林 541004

摘要: 针对倾斜航空摄影特点与匹配处理要求, 提出了融合尺度不变特征转换 SIFT 与半全局匹配 SGM 的倾斜影像密集匹配方法, 包括两个阶段: (1) 引入局部二阶矩变换的 SIFT 倾斜影像稀疏匹配。利用与二阶矩特征值有关的 Hessian-Gabor 算子提取影像初始特征, 通过窗口二阶矩变换及椭圆归一化处理去除特征邻域的仿射变化, 使得改进 SIFT 的特征描述符仿射不变性大大增强, 满足宽基线倾斜像对稳健匹配要求的同时并能获得较多的匹配特征作为后续 SGM 优化计算的路径约束条件; (2) 路径受限优化下的 SGM 倾斜影像密集匹配。以倾斜影像 SIFT 成功匹配像素的互信息为约束, 对 SGM 的动态规划路径进行分段纠正, 减小错误匹配代价的传播并加速最优路径搜索过程; 以匹配像素的离散视差信息为基础, 基于 TPS 变换生成良好初始视差图, 以提高 SGM 互信息计算的可靠性并提高计算效率; 对理想水平像对下的摄影测量水平核线重排过程进行扩展, 整体旋转摄影基线以消除分量 B_X , B_Y 的影响并建立虚拟“水平”像空间辅助坐标系, 从而利用相对定向参数生成沿扫描线方向的“水平”核线影像以满足 SGM 应用要求。倾斜影像密集匹配试验结果证明了算法的有效性, 可为后续摄影测量 DSM 自动生成或 3 维快速重建工作提供可靠、逐像素的密集匹配点。

关键词: 密集匹配, 倾斜摄影测量, SGM, SIFT

中图分类号: P237 **文献标志码:** A

引用格式: 吴军, 姚泽鑫, 程门门. 2015. 融合 SIFT 与 SGM 的倾斜航空影像密集匹配. 遥感学报, 19(3): 431-442

Wu J, Yao Z X and Cheng M M. 2015. Airborne oblique stereo image dense matching by integrating SIFT and SGM algorithm. *Journal of Remote Sensing*, 19(3): 431-442 [DOI: 10.11834/jrs.20154132]

1 引言

密集匹配 (Dense Matching) 是摄影测量数字表面模型 (DSM) 生成、正射影像纠正以及 3 维重建工作的基础步骤和关键技术 (Gehrke 等, 2010), 它不仅要对影像上少量的“兴趣点”、显著特征或显著区域进行成功匹配, 还必须解决广泛存在于影像上的遮挡、纹理缺乏/重复区域以及灰度不连续性边界等典型困难区域 (Scharstein 和 Szeliski, 2002) 的视差计算问题, 以输出逐像素 (Hirschmüller, 2008) 或准稠密 (Lhuillier 和 Quan, 2005; Kannala 和 Brandt, 2007) 的视差图, 是数字摄影测量以及计算机视觉领域研究的热点、难点。现有密集匹配方法可概略分为两类: 局部匹配传播和全局能量最小化计算。

基于局部匹配传播的影像密集匹配过程主要从已匹配特征出发, 自适应建立约束来实现匹配特征局部区域部分或全部像素的可靠匹配。(Zhu 等, 2007) 利用已知良好匹配点在 TIN 的约束下进行纹理自适应的匹配传播, 同时利用新匹配点对 TIN 进行动态细化, 有利于减少因纹理贫乏因素而导致的错误匹配, 但其三角形内部区域连续假设对初始匹配点的空间分布有较高要求, 且灰度不连续边界的有效匹配也是一个潜在问题; Lhuillier 和 Quan (2000) 提出了一个基于规则格网的匹配传播方法, 其关键在于能拟合格网内所有成功匹配点以得到一个局部的潜在平面片, 适用于平面或近平面场景; 华顺刚和曾令宜 (2007) 以少量匹配角点及其计算得到的基础矩阵为基础, 将核线分段并采用动态

收稿日期: 2014-06-03; 修订日期: 2014-10-09; 优先数字出版日期: 2014-10-16

基金项目: 国家自然科学基金 (编号: 41271362; 60962003); 广西自然科学基金 (编号: 2014GXNSFAA118302); 广西研究生教育创新项目 (编号: 2013010101); 桂林电子科技大学创新团队项目

第一作者简介: 吴军 (1973—), 男, 教授, 现从事数字摄影测量、计算机视觉、遥感图像处理理论和应用研究, 已发表论文 30 篇。E-mail: wu-jun93161@hotmail.com

©1994-2021 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

规划方法寻找同名核线上所有像素间的对应关系,从而获得密集视差,该方法隐含使用了视差的顺序性及唯一性约束,但未考虑因较大透视变形而导致的同名核线段长度差异以及遮挡影响。针对宽基线立体密集匹配问题, Kannala 和 Brandt (2007) 以及许振辉等人 (2009) 以 Hessian-Affine 特征提取与匹配为基础,在仿射变形改正后的邻域上完成相似性判断并进行迭代匹配传播,获得了准稠密匹配结果。基于全局能量最小化计算的影像密集匹配代表方法主要有基于图论的 Graph Cuts 和贝叶斯统计推断框架下的 Belief Propagation (Sun 等, 2003), 该类方法将视差图视为马尔可夫随机场 MRF (Markov Random Field), 以单个像素的真实视差为随机变量,通过对 MRF 的模拟、推理以及等价的全局能量最小化计算来获得最优视差图 (Szeliski 等, 2006)。与适用于窄基线立体影像密集匹配的窗口相关类方法 (Scharstein 和 Szeliski, 2002; Tang 等, 2002) 相比,全局能量最小化计算无须考虑相关窗口大小适应性问题以及隐含的窗口内视差一致性要求,能有效克服影像遮挡并实现非连续性保持 (discontinuity-preserving) (Boykov 等, 2001; Sun 等, 2005), 在稳定性、可靠性方面有较大优势,但计算代价高昂、影像匹配效率低下。以多路径动态规划作为全局能量

最小化计算策略,半全局匹配 SGM (Semiglobal Matching) (Hirschmüller, 2008) 保留了动态规划高效的特点,并可取得媲美于 LIDAR 点云的密集匹配效果 (Gehrke 等, 2008), 但该方法计算效率依赖于视差搜索范围且会因视差搜索范围过大而出现匹配代价函数局部最优,影响匹配质量。

近年来,以美国 Pictometry 公司为代表的机载倾斜摄影技术发展与应用引起了国际社会的普遍关注 (Nils 和 Schroth, 2003; Wang 等, 2008; Petrie, 2009; Gerke 和 Kerle, 2011; Nyaruhuma 等, 2012)。较之传统的垂直航空摄影,机载倾斜摄影一方面获得了空间信息更完整、更冗余的多视角倾斜航拍影像,更有利于摄影测量 DTM 高质量获取、城市 3 维重建效率提升等 (Wang 等, 2008; Nyaruhuma 等, 2012), 另一方面也给现有航空影像处理技术带来了挑战,如影像密集匹配,本文吸收现有两类影像密集匹配方法的优点,基于计算机视觉领域的最新匹配成果 SGM 和尺度不变特性转换 SIFT,提出了融合 SIFT 与半全局匹配 SGM 的倾斜航空影像密集匹配方法,基本思想是以 SIFT 成功匹配特征隐含的视差、互信息知识来约束、引导 SGM 计算过程,从而提高其密集匹配可靠性、效率,整体框架如图 1 所示。

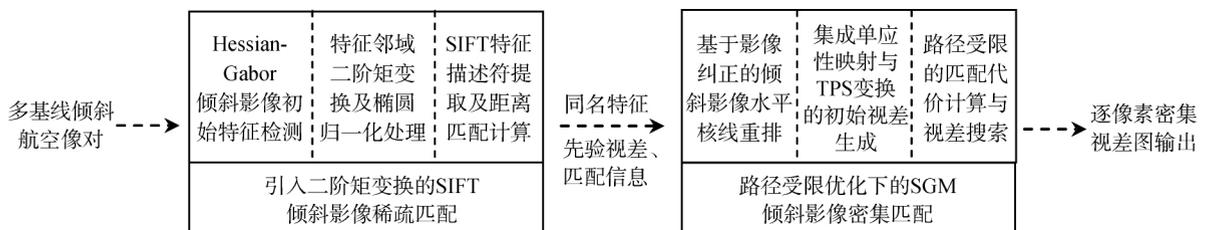


图 1 融合 SIFT 与 SGM 的倾斜航空影像密集匹配框架示意

Fig. 1 Depict of framework of airborne oblique stereo image dense match by integrating SIFT and SGM algorithm

2 引入局部二阶矩变换的 SIFT 倾斜影像稀疏匹配

按马耳他十字 (Maltese Cross) 配置的倾斜摄影系统 (Nils 和 Schroth, 2003) 通常由 5 个相机组成: 1 个相机镜头垂直向下, 其他 4 个相机按约 45° 的倾角在航向和旁向对称排列, 如图 2 所示, 其中图 (a) 为荷兰 Track Air 公司的 MIDAS (Multi Cameras Integrated Digital Acquisition System) 倾斜摄影系统结构 ([2014-06-03] <http://www.trackair.com>), 图 (b) 为对

由倾斜摄影系统成像特点可知,倾斜航空影像立体匹配算法设计需同时考虑和满足以下 3 类摄影基线条件:

(1) 近似垂直摄影,为倾斜摄影系统中垂直向下相机所拍摄,其影像重叠区域内遮挡较少,光照变化不大,同名像素相对运动简单,像素间尺度变化不明显,匹配复杂性主要由场景变化决定。

(2) 大视角倾斜摄影,为倾斜摄影系统中同一倾斜相机所拍摄,由于大角度投影导致的剧烈透视效果,其影像重叠区域内光照发生变化,影像遮挡区域增多,同名像素相对运动较复杂且像素间尺度变化明显,匹配复杂性主要由场景变化及相机倾斜

摄影产生的大角度透视变形决定。

(3) 交向摄影,这里限定为倾斜摄影系统中垂直相机与倾斜相机相隔若干条航线所拍摄,由于两相机有效焦距不同(倾斜相机焦距 $\geq 1.414 \times$ 垂直相机焦距)且为大角度交向摄影,其影像重叠区域内光照变化显著,遮挡严重,同名像素相对运动复杂且像素间存在非常大的尺度变化,匹配复杂性主要由场景变化、相机交向摄影产生的大角度透视变形及焦距不同导致的尺度变化决定。

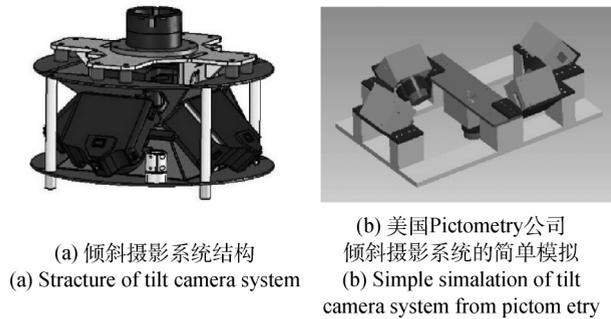


图2 五目倾斜光学摄影系统的马耳他十字配置示意

Fig.2 Depict of Maltese Cross camera configure of airborne oblique imaging system

以上倾斜摄影基线条件中的第一类为传统航空摄影方式,其立体匹配问题研究开展已较广泛、深入,后两类属于典型的宽基线立体匹配(wide baseline match)问题,是目前数字摄影测量及计算机视觉领域研究的难点与热点。由 Lowe 提出的尺度、旋转不变特征算子 SIFT 被广泛用于立体影像匹配领域,但随着拍摄视角增大,SIFT 重复特征提取率急剧降低,甚至于无法获得重复特征,这使得 SIFT 难以满足存在剧烈透视效果的、大(多)角度对地摄影条件下的倾斜影像稳健匹配要求。一般认为,影像局部邻域足够小时,光滑表面的透视变换可由仿射变换近似(Mikolajczyk 和 Schmid, 2004),为增强 SIFT 特征描述符的仿射不变性,本文引入窗口二阶矩变换来去除 SIFT 特征邻域仿射变化,综合考虑与二阶矩变换相联系的特征检测、椭圆归一化处理等问题,SIFT 倾斜影像稀疏匹配的实施步骤为:

(a) 基于 Hessian-Gabor 算子的倾斜影像初始特征检测。窗口二阶矩计算要求给出位置、尺度已知的特征邻域,且该特征邻域内的主要信号变化应与二阶矩特征值所相联系,由于 SIFT 是通过比较图像空间相邻 8 个像素点以及尺度空间相邻尺度的 18 个像素点来获得局部极值点作为初始特征,其特征

邻域并不具备该特性,这里采用与二阶矩特征值几何意义有关的 Hessian-Gabor 算子(文朝辉和路红, 2012)来提取倾斜影像初始特征,该算子同时还采用了与高斯函数相似、但时频特性更接近于人视觉感受的 Gabor 函数作为图像尺度空间选取特征尺度方法,相比于 SIFT 采用的高斯拉普拉斯(LoG)方法,在特征尺度提取方面具有更好的适应性和可靠性(徐婉莹等, 2011)。

(b) 基于二阶矩变换的特征邻域椭圆归一化处理。依次选取 Hessian-Gabor 特征,令 m 表示其邻域灰度窗口二阶矩,可依据式(1)进行椭圆归一化处理:

$$V^T U^T m U V = V^T \begin{pmatrix} \lambda_1 & \\ & \lambda_2 \end{pmatrix} V = \sqrt{\lambda_1 \lambda_2} E \quad (1)$$

$$U^T m U = \begin{pmatrix} \lambda_1 & \\ & \lambda_2 \end{pmatrix} = \Lambda, V = \begin{bmatrix} \left(\frac{\lambda_1}{\lambda_2}\right)^{-\frac{1}{4}} \\ \left(\frac{\lambda_2}{\lambda_1}\right)^{\frac{1}{4}} \end{bmatrix} \quad (2)$$

式中, U 为使二阶矩 m 对角化的单位正交阵($U U^T = U^T U = I$); λ_1, λ_2 为二阶矩 m 的矩阵特征值; V 为构造矩阵,目的在于将以 λ_1, λ_2 为长、短轴的椭圆归一化为半径为 $(\lambda_1 \lambda_2)^{1/4}$ 的圆。由于窗口二阶矩的计算与特征邻域隐含的椭圆大小、方向相关,这里依据文献(Mikolajczyk 和 Schmid, 2004)给出的迭代计算过程精确估计特征邻域椭圆参数。

(c) SIFT 特征描述符提取与距离匹配计算,即从椭圆归一化处理后的特征邻域中提取 128 维的 SIFT 描述符矢量,并通过矢量距离计算以及比较给出匹配结果。由式(1)可知,位于立体影像上的同一特征,其存在仿射变化的邻域灰度窗口经椭圆归一化处理,仅存在尺度变化 $\lambda = \sqrt{\lambda_1^L \lambda_2^L} / \sqrt{\lambda_1^R \lambda_2^R}$ 以及圆之间的相对旋转变化,因此,相对于原始影像窗口,从椭圆归一化后的影像窗口提取的 SIFT 特征描述符具有更强的抗仿射变换“干扰”的能力,进一步的特征相似性计算与量测也更为可靠与稳健,能有效满足不同摄影基线条件下的倾斜立体影像稳健、可靠匹配要求,并能获得远多于 SIFT 的特征匹配数量。

3 路径受限优化下的 SGM 倾斜影像密集匹配

一种改进的动态规划匹配方法,该方法以影像互信息作为匹配相似性测度,光照变换不敏感,并通过引入平滑约束来提高整体匹配的可靠性,总体上分为3个阶段:

(a) 像素匹配代价计算。基于互信息的像素匹配代价定义为:

$$C_{MI}(p, d) = -mi_{I_b, I_m}(I_{bp}, I_{mq})$$

$$mi_{I_b, I_m}(i, k) = h_{I_b}(i) + h_{I_m}(k) - h_{I_b, I_m}(i, k)$$

$$h_{I_b}(i) = -\frac{1}{n} \log(P_{I_b}(i))$$

$$h_{I_b, I_m}(i, k) = -\frac{1}{n} \log(P_{I_b, I_m}(i, k))$$

式中 mi_{I_b, I_m} 为基于信息熵给出的影像互信息, I_{bp} 表示参考影像像素 p 的灰度值, I_{mq} 表示匹配影像中与 p 所对应的像素 $q = e_{bm}(p, d)$ 的灰度值, $e_{bm}(p, d)$ 表示待匹配影像中 p 所对应的核线 d 为视差,若待匹配影像已沿扫描线方向进行核线,则 $e_{bm}(p, d) = [p_x + d, p_y]$; P_{I_b}, P_{I_b, I_m} 分别表示待匹配影像灰度概率分布及联合概率分布,可通过影像灰度直方图求出; $\otimes g(i, k)$ 表示高斯卷积, n 表示影像总像素。

(b) 视差计算。以上述像素匹配代价为基础,SGM 定义如下能量函数(代价函数):

$$E(D) = \sum_p \left(C_{MI}(p, d_p) + \sum_{q \in N_p} P_1 T[|d_p - d_q| = 1] + \sum_{q \in N_p} P_2 T[|d_p - d_q| > 1] \right)$$

式中 $C_{MI}(p, d_p)$ 为上述定义的像素匹配代价, p 为任一像素, N_p 为像素 p 的邻域, P_1, P_2 为对像素 p 邻域内视差变化的惩罚系数, D 为待匹配影像的密集视差图, T 为选取惩罚系数的布尔函数。为解决 $E(D)$ 全局最小化计算这一非确定性问题,SGM 采用了如下多路径动态规划优化计算:

$$\min_d S(p, d) : S(p, d) = \sum_r L_r(p, d) \quad (3)$$

$$L_r(p, d) = C_{MI}(p, d) + \min(L_r(p-r, d), L_r(p-r, d-1) + p_1, L_r(p-r, d+1) + p_1, \min_i L_r(p-r, i) + p_2)$$

$$\min_k L_r(p-r, k) \quad (4)$$

式中 $L_r(p, d)$ 表示像素 p 沿路径 r 的匹配代价, d 为视差; $L_r(p-r, d)$ 表示当前路径 r 上 p 的前一个点的匹配代价; $S(p, d)$ 为累加路径代价,在一定视差搜索范围内取最小值对应的视差为像素 p 的最优视差。

(c) 视差优化。主要包括左右一致性视差检查、滤波、插值、亚像素精度计算等。

SGM 以其逐像素匹配能力及媲美 LIDAR 点云质量的匹配效果在传统航空、航天影像处理中获得了重视与应用,但与传统的对地垂直摄影不同,大角度倾斜摄影以及交向摄影存在严重的影像透视失真、更多的遮挡以及大的投影差,由式(3)(4)可知,SGM 当前像素的匹配代价计算与其路径方向上前一像素有关,这就意味着,倾斜影像上遮挡、阴影等困难区域的像素错误匹配势必影响其所在路径上后续像素点匹配代价的计算,此外,就大投影差倾斜影像而言,即使是非困难区域像素,过大的视差搜索范围也易导致代价函数出现局部最优,产生匹配错误并沿路径向后传播。本文倾斜影像稀疏匹配阶段已获得的大量同名特征(像素),这些可靠同名特征所隐含的视差、互信息知识无疑可引入到 SGM 计算过程以提高其匹配可靠性,下文将据此展开讨论。

3.1 倾斜影像“水平”核线重排

SGM 仅适用于无上下视差的核线影像。立体视觉领域对核线影像生成已有较深研究,多通过基本矩阵来获得同名核线并将其覆盖的像素“取出”重新进行排列(马颂德和张正友,2003),但该方式需遍历搜索每条核线且不利于原始影像与核线影像像素间的相互索引(需记录每条核线在原始影像的起、始位置),这里从摄影测量影像“置平”数字纠正过程出发,对其理想水平像对(像片水平、基线水平且平行于大地坐标系)下的摄影测量水平核线重排过程(张祖勋和张剑清,2002)进行扩展,给出一种适用于多种倾斜摄影基线条件、原始影像与核线影像映射关系计算简单的“水平”核线重排方法。

如图3所示,令 S_1, S_2 为摄影基线, L, L' 为立体像对 P, P' 上的某同名核线,摄影基线 S_1, S_2 在像空间辅助坐标系下的基线分量分别为 B_x, B_y, B_z ,则在理想基线条件($B_y = 0, B_z = 0$)下,核面与水平影像相交得到的左右核线相互平行,并且与扫描线重合。此时,以主点为坐标原点的水平影像坐标 (u, v) 与原始影像坐标 (x, y) 满足下列关系式:

$$\begin{bmatrix} x \\ y \\ -f \end{bmatrix} = \lambda \mathbf{R}^T \begin{bmatrix} \mu \\ v \\ -f \end{bmatrix} \Rightarrow \begin{cases} x = -f \frac{a_1 \mu + b_1 v - c_1 f}{a_3 \mu + b_3 v - c_3 f} \\ y = -f \frac{a_2 \mu + b_2 v - c_2 f}{a_3 \mu + b_3 v - c_3 f} \end{cases} \quad (5)$$

式中 \mathbf{R} 为像空间坐标系到像空间辅助坐标系的旋转矩阵, $a_i, b_i, c_i (i=1, 2, 3)$ 为旋转矩阵元素, f 为相机有效焦距。

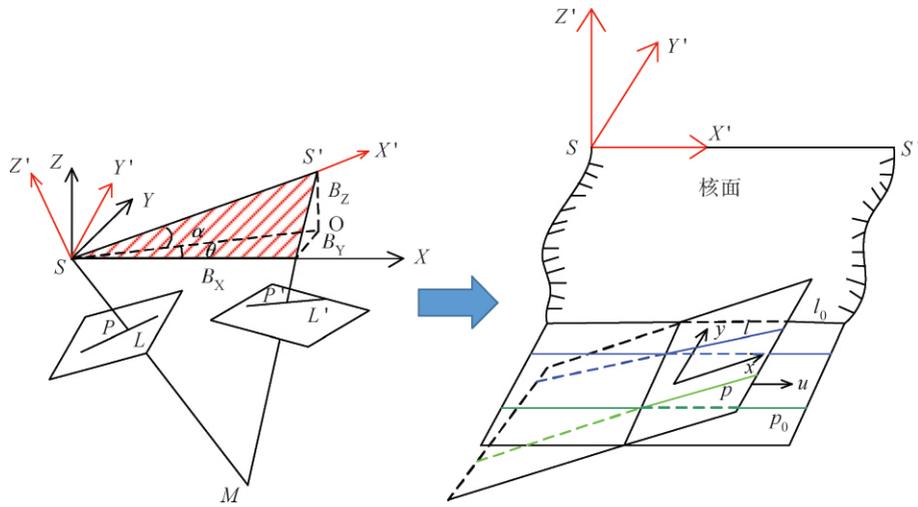


图3 倾斜影像的虚拟“水平”核线重排示意

Fig.3 Depict of generation of “horizontal” epipolar image for various oblique image pair

实际像对中理想基线条件可能不存在,但可整体旋转像空间辅助坐标系 $S-X'YZ'$,使旋转后坐标系下的基线符合理想条件,为此建立新像空间辅助坐标系 $S-X'Y'Z'$,其中: X' 轴与基线 S_1, S_2 重合, Z' 轴垂直于平面 ΔS_1S_2X 且指向上方, Y' 轴向依据右手法则建立,则旋转至该坐标系下的过程为:

(1) 首先绕 Z 轴旋转角度 θ : $\tan\theta = B_Y/B_X$,以消除基线分量 B_Y 的影响,设旋转矩阵为 R_{B_Z} ,即有:

$$\begin{aligned}
 & (B_{XY} = \sqrt{B_X^2 + B_Y^2}) \\
 & \begin{bmatrix} B_{XY} \\ 0 \\ B_z \end{bmatrix} = R_{B_Z} \begin{bmatrix} B_X \\ B_Y \\ B_z \end{bmatrix} \quad R_{B_Z} = \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \sin(\theta) & 0 \\ -\sin(\theta) & \cos(\theta) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (6)
 \end{aligned}$$

(2) 再绕 Y 轴旋转角度 α : $\tan\alpha = B_Z/B_{XY}$, $B_{XY} = \sqrt{B_X^2 + B_Y^2}$,以消除基线分量 B_Z 的影响,设旋转矩阵为 R_{B_Y} ,即有: $(B_{XYZ} = \sqrt{B_X^2 + B_Y^2 + B_Z^2})$

$$\begin{aligned}
 & \begin{bmatrix} B_{XYZ} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = R_{B_Y} \begin{bmatrix} B_{XY} \\ 0 \\ B_z \end{bmatrix} \quad R_{B_Y} = \begin{bmatrix} \cos(\alpha) & 0 & \sin(\alpha) \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin(\alpha) & 0 & \cos(\alpha) \end{bmatrix} \quad (7)
 \end{aligned}$$

顾及到像空间坐标系到像空间辅助坐标系 $S-X'YZ'$ 的旋转,则由像空间坐标系到新像空间辅助坐标系 $S-X'Y'Z'$ 的旋转矩阵 R' 为 $R' = R_{B_Y}R_{B_Z}R$,则以 R' 代替 R ,利用式(5)可建立原始影像与其虚拟“水平”影像间的严格映射关系,实现虚拟“水平”核线重排。

在相机内参数已知条件下,上述倾斜影像“水平”核线重排还需给出摄影基线 S_1, S_2 各分量大小

以及从像空间坐标系到像辅助空间坐标系的旋转矩阵 R ,本文以倾斜影像稀疏匹配获得的同名点为观测值,通过严格摄影测量相对定向过程(张祖勋和张剑清,2002)给出待匹配立体像对相对定向元素参数,进而计算得到摄影基线各分量以及各自的旋转矩阵。由于摄影测量相对定向的解算基础是影像上下视差为0,则根据该定向参数进行影像“置平”数字纠正将能很好的满足SGM核线影像无上下视差要求,并能很方便建立原始影像与核线影像间的映射关系,为后续基于TPS变换的SGM视差初始化奠定了基础。

3.2 SGM 匹配代价路径“分段”纠正

倾斜影像稀疏匹配阶段已获得相当数量的正确同名点,这些同名点因坐标已知可直接确定其视差,相应的匹配代价亦可唯一给出,则SGM多路径动态规划优化计算可修改为:

$$\begin{aligned}
 & \min_d S(p, d) : S(p, d) = \sum_r L_r(p, d) \quad (8) \\
 & L_r(p, d) = \begin{cases} L_r(p, d) & p \notin P \\ C(p, d) & p - q = d, p \in P \\ \text{Invalid} & p - q \neq d, p \in P \end{cases} \quad (9)
 \end{aligned}$$

式中 P 为同名点集, (p, q) 为 P 中的某一对同名点。由式(9)不难发现,新的SGM多路径动态规划优化计算中,已知同名点的像素匹配代价不受其所在路径前面像素的影响,相反的,还可起到“阻断”错误匹配代价向后传播、对错误匹配路径进行“分段”纠正的作用。如图4所示,令 p_i 表示像素 d_i 表示视差, c_{d_i} 表示该像素点视差为 d_i 的匹配代价,黄色线段表示正确匹配路径(最小路径代价),红色线

段表示错误匹配路径,则当该错误路径上某一像素,如 p_{i+4} ,为已知匹配点时,通过将其匹配代价 c_d 的计算限制在规定视差(其余视差对应的匹配代价均置为无效值 \times ,见图 4(b)),可强制使动态规划路径经过该像素,从而对后续错误匹配路径进行纠正,见图 4(b) 绿色线段。基于上述认识,本文将倾斜影像稀疏匹配阶段获得的同名点像素引入到 SGM 倾斜影像密集匹配过程中,作为“锚点”对 SGM 匹配代价计算路径进行限制,从而达到减少错误匹配代价传播而提高匹配质量的目的。

正,见图 4(b) 绿色线段。基于上述认识,本文将倾斜影像稀疏匹配阶段获得的同名点像素引入到 SGM 倾斜影像密集匹配过程中,作为“锚点”对 SGM 匹配代价计算路径进行限制,从而达到减少错误匹配代价传播而提高匹配质量的目的。

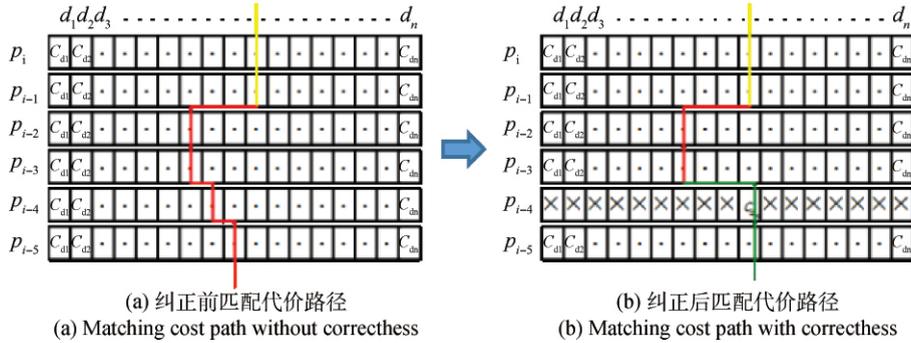


图 4 SGM 匹配代价路径“分段”纠正示意

Fig. 4 Depict of piecewise matching cost correctness for path-constrained SGM

3.3 基于 TPS 变换的 SGM 视差初始化

顾及到透视几何失真,SGM 采用了金字塔策略以提高影像互信息计算的准确性(Hirschmüller, 2008),即在顶层金字塔影像首先以随机方式产生初始视差并实施 SGM 匹配,进而将上一层金字塔影像密集匹配得到的视差图映射到下一层影像重新计算互信息,由于新视差图能给出待匹配像对重叠区域更为准确的映射关系,则像素互信息计算也越来越准确。从减少 SGM 影像金字塔互信息计算角度出发,这里给出一种基于薄板自然样条函数 TPS 变换(Bookstein, 1989)生成倾斜影像良好初始视差图的方法,其基本思想是通过 TPS 变换近似建立待匹配影像空间映射关系来计算像素概略视差值,并利用倾斜影像稀疏匹配获得的同名像素坐标信息来估计其变换参数。对于 2 维影像,TPS 采用两个独立函数来建立其映射关系: $T(x, y) = (f_x(x, y), f_y(x, y))$, 以映射 $f_x(x, y)$ 为例,通常具有数学形式:

$$f_x(x, y) = a_0 + a_1x_j + a_2y_j + \sum_{i=1}^n A_i g(r_i) \quad (10)$$

$$g(r_i) = \begin{cases} r^2 \lg r^2 & r_i \neq 0 \\ 0 & r_i = 0 \end{cases} \quad r_i^2 = (x_i - x_j)^2 + (y_i - y_j)^2$$

$$\sum_{i=1}^n A_i = \sum_{i=1}^n A_i x_i = \sum_{i=1}^n A_i y_i = 0$$

式中 $a_0, a_1, a_2, A_i (i=1, \dots, n)$ 为 $n+3$ 个薄板样条参数, n 为控制点的个数, r_{ij} 为控制点 $P_i(x_i, y_i)$,

$P_j(x_j, y_j)$ 间的欧氏距离。

TPS 具有光滑插值、无参数控制、闭合解等多种优点,是唯一能够清楚地将映射分解为刚性映射和非刚性映射的样条函数(Bookstein, 1989),由式(10)可知,其刚性映射由仿射变换来表达,但仿射变换仅是一种弱透视变换,不足以描述大视角倾斜摄影以及交向摄影像对内在的强烈透视几何变换,这里将具有强透视变换特性的单应性矩阵 H 引入 TPS 刚性映射部分,以增强其“透视”变换表达能力,即

$$f'_x(x, y) = \frac{h_3 + h_1x_j + h_2y_j}{1 + h_7x_j + h_8y_j} + f_x(x, y) \quad (11)$$

$$f'_y(x, y) = \frac{h_6 + h_4x_j + h_5y_j}{1 + h_7x_j + h_8y_j} + f_y(x, y) \quad (12)$$

式中 $h_i (i=1, \dots, 8)$ 为单应性矩阵 H 的元素,综合考虑单应性矩阵元素计算、TPS 变换参数估计以及 SGM 核线影像匹配要求,这里基于 TPS 变换的 SGM 视差初始化步骤为:

(a) 单应性矩阵计算。根据影像相对透视关系,单应性矩阵 H 可按下式计算(马颂德和张正友, 2003):

$$H = \frac{\lambda_0}{\lambda_1} K_1 R K_0^{-1} = \frac{\lambda_0}{\lambda_1} \begin{pmatrix} \frac{f_1}{f_0} \frac{r_1}{r_9} & \frac{f_1}{f_0} \frac{r_2}{r_9} & f \frac{r_3}{r_9} \\ \frac{f_1}{f_0} \frac{r_4}{r_9} & \frac{f_1}{f_0} \frac{r_5}{r_9} & f_1 \frac{r_6}{r_9} \\ \frac{1}{f_0} \frac{r_7}{r_9} & \frac{1}{f_0} \frac{r_8}{r_9} & 1 \end{pmatrix} \quad (13)$$

$$K_2 = \begin{pmatrix} f_1 & 0 & 0 \\ 0 & f_1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}, K_1 = \begin{pmatrix} f_0 & 0 & 0 \\ 0 & f_0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix},$$

$$K_2 = \begin{pmatrix} r_1 & r_2 & r_3 \\ r_4 & r_5 & r_6 \\ r_7 & r_8 & r_9 \end{pmatrix}$$

式中 R 为立体影像相对旋转矩阵,可由各倾斜像对相对定向参数(角元素)依据摄影测量转角系统(张祖勋和张剑清 2002)给出, $K_i (i=0, 1)$ 为相机检校矩阵, $f_i (i=0, 1)$ 为相机有效焦距长度。

(b) TPS 变换参数估计,即以各倾斜像对成功匹配像素为控制点对,将(a)计算得到的单应性矩阵引入式(11)(12)建立线性方程,进而求解 TPS 变换参数。

(c) 逐像素计算初始视差。对基准影像中任一像素 $P(x, y)$,首先利用式(11)(12)计算其 TPS 变

换结果 $P'(x, y)$,再根据式(5) — (7) 获得核线影像上的对应坐标 $E(x, y), E'(x, y)$,两者 X 坐标之差即为该像素视差。

4 实验与分析

本文以 Microsoft Visual Studio 2010 作为软件开发工具,在惠普工作站(主频 3.6 G,内存为 16 G)、Windows 7 操作系统下实现了上述算法。试验所需的倾斜航空影像由 Track Air 公司的 MIDAS 倾斜摄影系统获取,该系统相机内参数已知,并利用航空飞行平台搭载的低精度 POS 系统给出了每张倾斜影像的外方位元素概略值,影像像幅大小 5616×3744 像素,空间分辨率约为 0.1 m,均已进行畸变改正处理,图 5 给出了某城市试验区域的五方向倾斜航空影像。

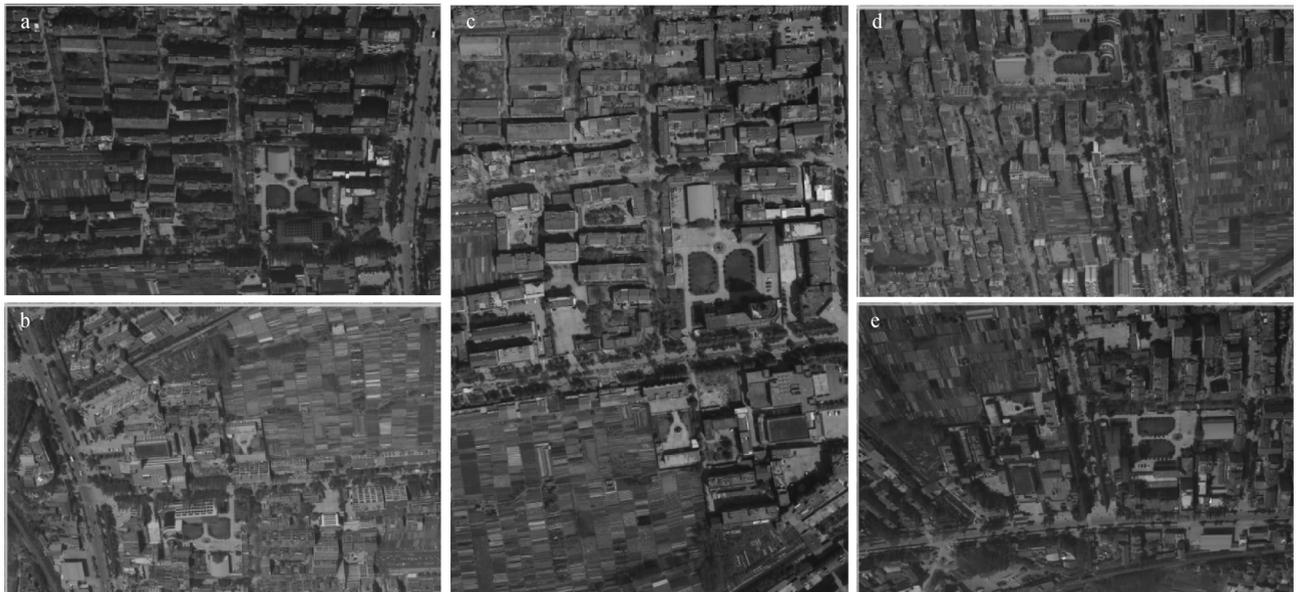


图 5 某城市区域的五方向倾斜航空影像

Fig. 5 Depict of airborne multi-vision oblique imageries over local urban test area

限于论文篇幅,从图 5 中选取两个方向的倾斜影像参与匹配试验,其中以图 5 中 c 图为基准选取同一航线的相邻影像组成垂直立体像对图 6(a),以图 5 中 b 图为基准选取同一航线的相邻影像组成大视角倾斜立体像对图 6(b),由图 5 中 b、c 图组成交向摄影立体像对图 6(c)。根据节 2 给出的改进 SFIT 算子,分别对 3 种基线条件下的倾斜立体实施特征匹配,并通过摄影测量相对定向过程对误配点进行剔除以确保匹配的可靠性,图 6 给出了 3 个像

对的匹配结果,其中:对应于图 6(a)的垂直摄影像对的成功匹配特征点为 6578 对,对应于图 6(b)的倾斜摄影像对的成功匹配特征点为 10719 对,对应于图 6(c)的交向摄影像对的成功匹配特征点为 387 对,与直接在原始像对上实施 SIFT 匹配的结果(垂直像对-成功匹配特征点 3243,倾斜像对-成功匹配特征点 2852 对,交向像对-成功匹配特征点 93 对)相比,改进算子的成功匹配特征成倍增长,尤其是匹配难度大的大视角倾斜摄影像对,交向摄影像

对,成功匹配特征数目约为原 SIFT 的 4 倍,为后续估计倾斜影像核线几何模型以及路径受限优化下的 SGM 密集匹配奠定了良好基础。

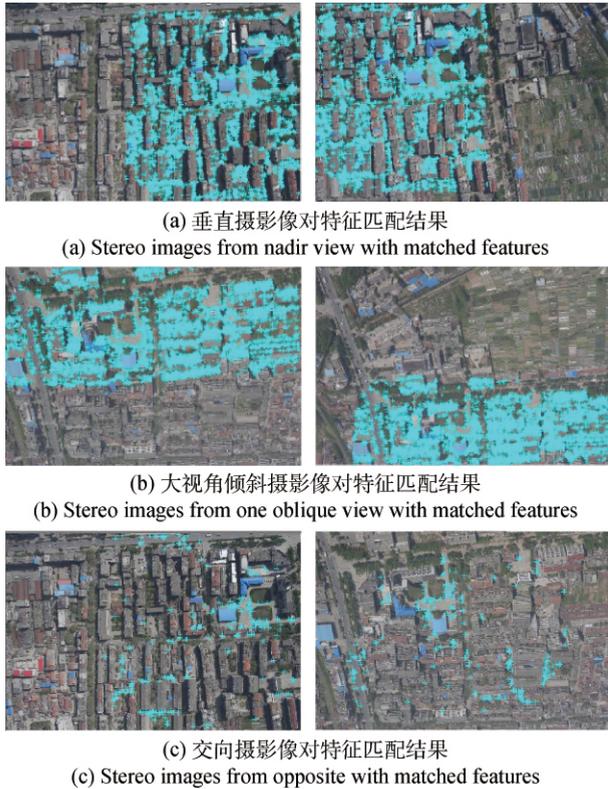


图 6 倾斜航空像对 SIFT 稀疏匹配结果示意
Fig. 6 Depict of sparse oblique stereo images match with improved SIFT algorithm , respectively

本文以倾斜影像稀疏匹配获得的同名特征点为观测值,以低精度 POS 数据为外方位元素初值,通过摄影测量相对定向给出待匹配立体像对定向参数,进而计算得到摄影基线各分量以及各自旋转矩阵,根据节 3.1 给出的方法对倾斜立体影像进行虚拟“水平”核线重排。以像对图 6(a)、图 6(b)为例,图 7 给出了倾斜像对的“水平”核线重排结果以及基于 TPS 变换生成的初始视差图,由图 7(c)(f)可以看出,对于垂直摄影像对及大视角倾斜摄影像对,以数量多且分布均匀的 SIFT 匹配特征为基础,通过 TPS 变换给出的初始视差图不仅可有效降低几何变形对影像互信息计算的影响,还能避免大量无效像素(黑色区域)参与 SGM 计算,从而一定程度上提高计算效率。对于交向摄影像对图 6(c),由于该像对 SIFT 匹配特征少且主要是地面点,TPS 变换难以有效近似其内在的复杂空间映射关系,生成的视差图质量与其他两个像对相比较差,这里限于篇幅未给出图片结果示意。

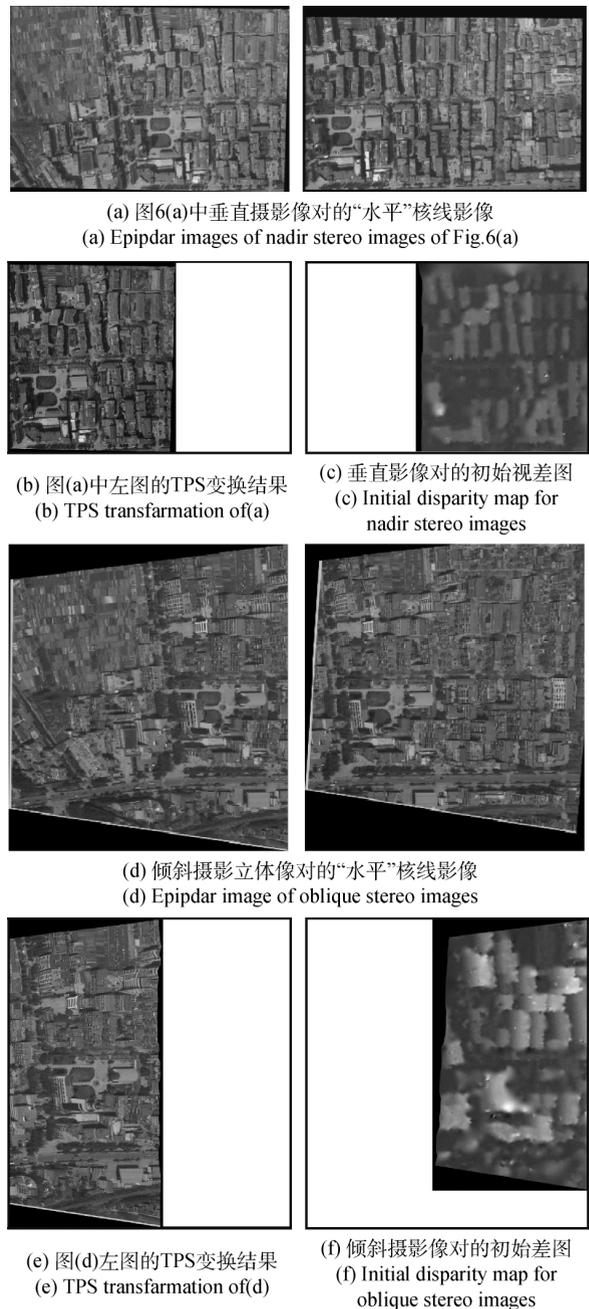


图 7 倾斜影像“水平”核线重排及初始视差图
Fig. 7 Depict of epipolar images and initial disparity map for select oblique stereo images

本文各倾斜像对核线影像密集匹配过程与原 SGM 方法相一致,但第一阶段影像互信息的计算基于初始视差图进行,并在第二阶段中引入倾斜影像稀疏匹配阶段获得的可靠同名点作为路径约束,以起到“阻断”“错误匹配代价向后传播并对匹配路径进行“分段”纠正的作用,从而有效消除 SGM 因视差搜索范围大而导致的匹配歧异性,图 8(a) 8(c), 8(e) 给出了 3 个像对重叠区域密集匹配得到的视差效果图,为进行比较,本文进一步给出了原 SGM

方法密集匹配生成的视差图,见图 8(b),8(d),8(f),两种方法采用了相同的有效覆盖路径数(8条)及 P_1, P_2 匹配参数设置,同一立体像对的视差搜索范围也相同。为方便结果对比,避免引入误差,这里 3 个像对的密集匹配结果经一致性视差检查去除误配点外,均未对视差图进行插值。

由图 8 可发现,路径约束的引入明显提高了垂直、倾斜像对的 SGM 密集匹配质量,匹配得到的视差图更完整(密集)并减少了“明亮”噪声(误配点)特别是倾斜像对匹配方面,原 SGM 受倾斜影像透视失真程度及视差搜索范围影响,其倾斜像对匹配结果较垂直像对匹配结果差,但由于引入的匹配特征约束更多($10719 - 6578 = 4141$)且空间分布均匀,改进 SGM 下的两个像对匹配质量已相接近;在交向影像对匹配方面,由于影像透视失真程度严重以及视差搜索范围过大导致 SGM 自身匹配可靠性大大降低,作为约束引入的稀疏匹配特征数量又远少于前两个像对($387/6578 \approx 5.9\%$, $387/10719 \approx 3.6\%$),因而改进 SGM 方法整体上并未改善匹配质量,但在一些存在匹配特征点的局部影像区域,仍起到了去除误配点、增加成功匹配像素的效果。本文试验结果表明:

(1) 以 Hessian-Gabor 算子提取倾斜影像初始特征,通过窗口二阶矩变换及椭圆归一化处理去除特征邻域仿射变化,使得改进 SIFT 的仿射不变性大大增强,大幅提高了倾斜影像成功匹配特征数量,为后续 SGM 动态规划路径约束的建立奠定了基础;

(2) 引入已匹配特征给出的像素匹配代价、视差先验知识,改进的 SGM 方法较好的解决了因视差搜索范围大而导致的匹配代价函数局部最优问题,避免了错误匹配代价的传播并加速动态规划最优路径搜索过程,从而获得高质量的倾斜影像密集匹配效果,图 9、图 10 分别给出了由本文倾斜影像垂直、倾斜像对匹配视差图计算得到的 3 维点云,并根据原始影像像素彩色信息进行了渲染。

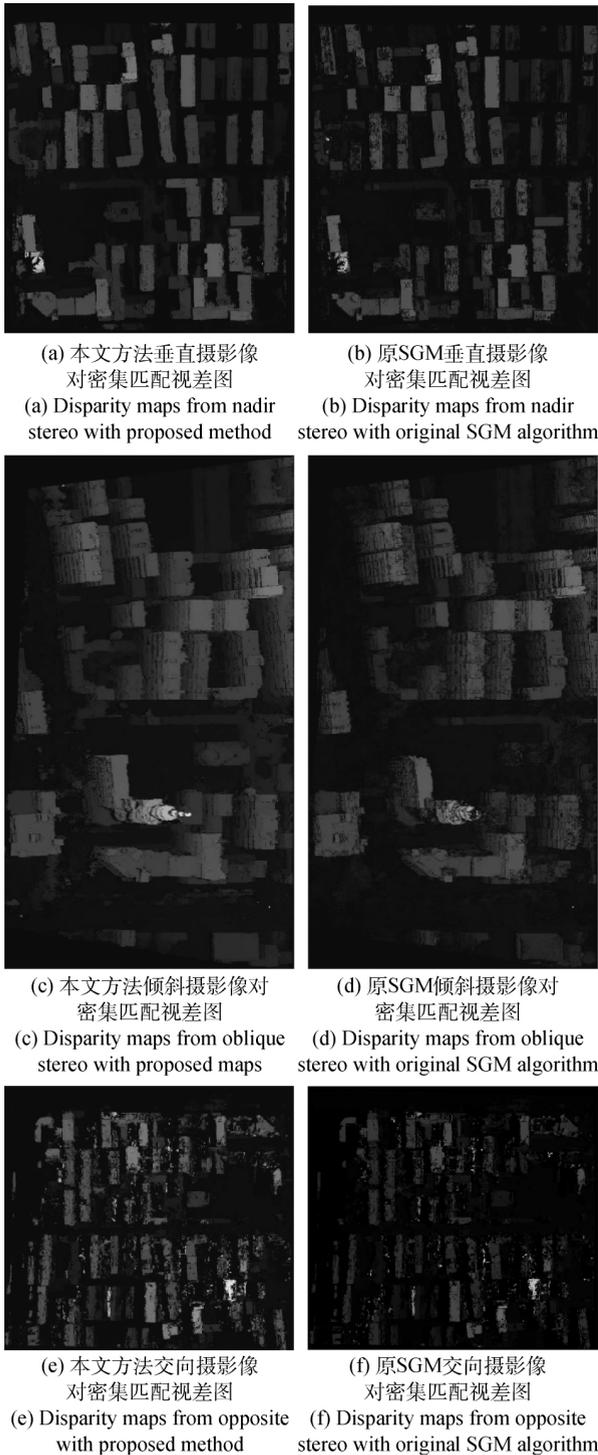


图 8 倾斜影像密集匹配视差图对比示意

Fig. 8 Depict of oblique image disparity maps generated

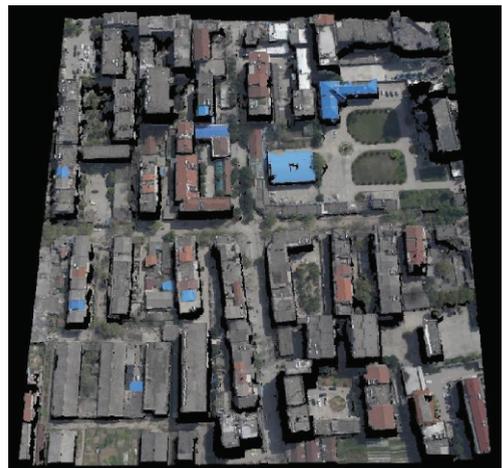


图 9 垂直像对 3 维点云渲染效果图

Fig. 9 Three-dimensional point clouds from nadir



图 10 倾斜像对 3 维点云渲染效果图

Fig. 10 Three-dimensional point clouds from oblique disparity map and corresponding images

5 结 论

本文吸收现有计算机视觉领域的最新成果,提出的融合 SIFT 与 SGM 的倾斜影像密集匹配方法,虽还不能解决倾斜影像交向摄影像对的密集匹配问题,但其在垂直、倾斜像对方面良好匹配质量足以满足完整恢复观测区域空间信息的目标,对于摄影测量 4D 产品快速生成以及计算机自动 3 维重建等倾斜影像应用处理已具备较高的实用价值。本文影像匹配方法仅限于双目视图,机载倾斜影像所固有的多视图约束尚未得到充分利用,如何进行多片、不同方向倾斜影像的定向与平差,将目前的双视匹配扩展至多视以进一步提高匹配质量,将是下一步的研究方向。

参考文献(References)

Bookstein F L. 1989. Principal warps: thin-plate splines and the decomposition of deformations. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 11(6): 567 - 585 [DOI: 10.1109/34.24792]

Boykov Y, Veksler O and Zabini R. 2001. Fast approximate energy minimization via graph cuts. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 23(11): 1222 - 1239 [DOI: 10.1109/34.969114]

Gerke M and Kerle N. 2011. Automatic structural seismic damage assessment with airborne oblique pictometry imagery. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 77(9): 885 - 898 [DOI: 10.14358/PERS.77.9.885]

Gehrke S, Morin K, Downey M, Boehrer N and Fuchs T. 2010. Semi-global matching: an alternative to LIDAR for DSM generation? *Int. Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Informa-*

tion Sciences, Calgary, Canada: 38(1)

Hua S G and Zeng L Y. 2007. Dense matching algorithm based on corner detection. *Computer Engineering and Design*, 28(5): 1092 - 1095 (华顺刚, 曾令宜. 2007. 一种基于角点检测的图像密集匹配算法. *计算机工程与设计*, 28(5): 1092 - 1095 [DOI: 10.3969/j.issn.1000-7024.2007.05.031])

Hirschmüller H. 2008. Stereo processing by semiglobal matching and mutual information. *IEEE Transaction on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 30(2): 328 - 341 [DOI: 10.1109/TPAMI.2007.1166]

Kannala J and Brandt S S. 2007. Quasi-dense wide baseline matching using match propagation // *Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*. Minneapolis: IEEE: 1 - 8 [DOI: 10.1109/CVPR.2007.383247]

Lhuillier M and Quan L. 2000. Robust dense matching using local and global geometric constraints // *Proceedings of the 15th International Conference on Pattern Recognition*. Barcelona: IEEE: 968 - 972 [DOI: 10.1109/ICPR.2000.905620]

Lhuillier M and Quan L. 2005. A quasi-dense approach to surface reconstruction from uncalibrated images. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 27(3): 418 - 433 [DOI: 10.1109/TPAMI.2005.44]

Ma S D and Zhang Z Y. 2003. *Computer Vision: the Calculation Theory and Algorithm*. Beijing: Science Press (马颂德, 张正友. 2003. *计算机视觉: 计算理论与算法基础*. 北京: 科学出版社)

Mikolajczyk K and Schmid C. 2004. Scale & affine invariant interest point detectors. *International Journal of Computer Vision*, 60(1): 63 - 86 [DOI: 10.1023/B:VISI.0000027790.02288.f2]

Nils K and Schroth O R. 2003. Oblique aerial photography a status review. *PE & RS, Stuttgart/Neubrandenburg*, 69(1): 53 - 57

Nyaruhuma A P, Gerke M, Vosselman G and Mitalo G E. 2012. Verification of 2D building outlines using oblique airborne images. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 71: 62 - 75 [DOI: 10.1016/j.isprsjprs.2012.04.007]

Petrie G. 2009. Systematic oblique aerial photography using multiple

- digital cameras. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 75(2): 102–107
- Scharstein D and Szeliski R. 2002. A taxonomy and evaluation of dense two-frame stereo correspondence algorithms. *International Journal of Computer Vision*, 47(1/3): 7–42 [DOI: 10.1023/A:1014573219977]
- Sun J, Li Y, Kang S B and Shum H Y. 2005. Symmetric stereo matching for occlusion handling // *Proceedings of the IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*. Beijing: IEEE: 399–406 [DOI: 10.1109/CVPR.2005.337]
- Sun J, Shun H Y and Zheng N N. 2003. Stereo matching using belief propagation. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 25(7): 787–800 [DOI: 10.1109/TPAMI.2003.1206509]
- Szeliski R, Zabih R, Scharstein D, Veksler O, Kolmogorov V, Agarwala A, Tappen M and Rother C. 2006. A comparative study of energy minimization methods for markov random fields // *Proceedings of the 9th European Conference on Computer Vision*. Berlin: Springer-Verlag Press: 16–29 [DOI: 10.1007/11744047_2]
- Tang L, Wu C K and Chen Z Z. 2002. Image dense matching based on region growth with adaptive window. *Pattern Recognition Letters*, 23(10): 1169–1178 [DOI: 10.1016/S0167-8655(02)00063-6]
- Wang Y, Schultz S and Giuffrida F. 2008. Pictometry's proprietary airborne digital imaging system and its application in 3D city modeling. *International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 37: 1065–1069
- Wen C H and Lu H. 2012. A Nobel Hessian-gabor based local interest point detection. *Computer Applications and Software*, 29(1): 15–18, 22 (文朝辉, 路红. 2012. 基于 Hessian 矩阵和 Gabor 函数的局部兴趣点检测. *计算机应用与软件*, 29(1): 15–18, 22) [DOI: 10.3969/j.issn.1000-386X.2012.01.004]
- Xu W Y, Huang X S, Liu Y H and Zhang W. 2011. A local characteristic scale selection method based on Gabor wavelets. *Journal of Image and Graphics*, 16(1): 72–78 (徐婉莹, 黄新生, 刘育浩, 张巍. 2011. 一种基于 Gabor 小波的局部特征尺度提取方法. *中国图像图形学报*, 16(1): 72–78)
- Xu Z H, Zhang F, Sun F M and Hu Z Y. 2009. Quasi-dense matching by neighborhood transfer for fish-eye image. *Acta Automatica Sinica*, 35(9): 1159–1167 (许振辉, 张峰, 孙凤梅, 胡占义. 2009. 基于邻域传递的鱼眼图像的准稠密匹配. *自动化学报*, 35(9): 1159–1167) [DOI: 10.3724/SP.J.1004.2009.01159]
- Zhang Z X and Zhang J Q. 2002. *Digital Photogrammetry*. Wuhan: Wuhan University Press (张祖勋, 张剑清. 2002. *数字摄影测量学*. 武汉: 武汉大学出版社)
- Zhu Q, Wu B and Zhao J. 2007. Propagation strategies for stereo image matching based on the dynamic triangle constraint. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 62(4): 295–308 [DOI: 10.1016/j.isprsjprs.2007.05.010]

Airborne oblique stereo image dense matching by integrating SIFT and SGM algorithm

WU Jun, YAO Zexin, CHENG Menmen

School of Electrical Engineering and Automation, Guilin University of Electronic Technology, Jinji Road Guilin 541004, China

Abstract: This paper presents our research on developing a dense image matching algorithm to generate a high-quality disparity map from airborne oblique stereo images. We conducted off-site measurements and analysis not on models but on the actual aerial photography of a site. The Oblique Photogrammetry System (OPS) was influenced by and significantly affected photogrammetry. Oblique images released by OPS are becoming an indispensable tool for general use, such as tax assessment and building deviation, urban and infrastructural planning, management of military and security operations, and critical infrastructural protection. However, processing oblique images is quite challenging in terms of automation and accuracy. For example, oblique image stereo matching is subjected to various obstacles, such as obvious illumination differences, serious occlusions, discontinuous object boundaries, and low or repetitive textures. To address such problems, an image matching approach based on the integration of improved SGM and SIFT algorithm is proposed to generate a dense disparity map from an airborne oblique image pair, which establishes a basis for automatic photogrammetry Digital Surface Model (DSM) generation or Computer Vision three dimensional visualization. The proposed approach is composed of two stages: (1) The first stage is sparse oblique image matching with improved SIFT algorithm, in which the affine invariance of the SIFT descriptor is enhanced by implementing local two-order moment transformation to feature neighbors detected by using Hessian-Gabor algorithm. Thus, robust matching results for various wide-baseline oblique image pairs are obtained and used to estimate epipolar geometry model or as path constraints incorporated into SGM in next stages. (2) The second stage is dense oblique image matching with constrained SGM algorithm, in which mutual information from matched features are used as an unchanged “anchor” to block the propagation of mistaken matching cost along some SGM paths and based on TPS transformation. Discrete parallax from matched features is used to generate a continuous disparity map for reliable SGM

mutual information computation. In addition, to generate the epipolar image input into SGM, an ideal photogrammetry image leveling algorithm is extended to oblique image pairs with various wide-baseline conditions by globally rotating wide-baseline vector to be horizontal. Then, orientation parameters of oblique image pairs are estimated with a matched feature coordinate by using photogrammetry relative orientation process. Selected five airborne oblique images from OPS with cameras positioned in the configuration of a Maltese cross are tested by using the proposed approaches. Thus, a high-quality dense disparity map is obtained. The following results were obtained: (1) The incorporation of Hessian-Gabor feature detector and local two-order moment transformation into the SIFT algorithm greatly enhances its affine invariance. Thus, reliable and rich conjunctive pixels can be obtained in various wide-baseline oblique image pairs, and these pixels are intended to be used as strong constraint for further dense matching. (2) Improved SGM could block the propagation of mistaken matching and accelerate path searching by means of mutual information and discrete parallax knowledge from known conjunctive pixels. Thus, a high-quality dense match result from oblique images can be obtained.

Key words: dense matching, oblique photogrammetry, SGM, SIFT